





**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Desarrollo del proceso de cementación para endurecimiento  
superficial mediante empaquetamiento de polvos y fluidización**

**Kevin Geovanny Carrillo Muñoz**

**Alfredo Valarezo, PhD., Director de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Quito, agosto de 2015

**Universidad San Francisco de Quito**  
**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Desarrollo del proceso de cementación para endurecimiento  
superficial mediante empaquetamiento de polvos y fluidización**

**Kevin Carrillo Muñoz**

Alfredo Valarezo, PhD.,  
Director de Tesis y Miembro del Comité .....

Lorena Bejarano, PhD.,  
Miembro del Comité de Tesis .....

David Escudero, PhD.,  
Miembro del Comité de Tesis .....

Alfredo Valarezo, PhD.,  
Director del Departamento de  
Ingeniería Mecánica .....

César Zambrano, PhD.,  
Decano del Colegio de Ciencias e Ingenierías .....

Quito, agosto de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: .....

Nombre: Kevin Geovanny Carrillo Muñoz

C. I.: 171927723-6

Fecha: Quito, agosto de 2015

## **Dedicatoria**

A mis padres, abuelos y hermana, por su apoyo incondicional.

## Resumen

Este proyecto de tesis desarrolla el proceso de cementado por empaquetado para un acero de bajo carbono, utilizando un lecho fluidizado. Este tratamiento tiene como fin enriquecer superficialmente al acero con carbono mediante difusión. De esta manera, se consigue una capa superficial con una concentración de carbono superior a la de su núcleo. Como efecto, el acero cementado adquiere una combinación útil de propiedades: alta dureza superficial y resistencia al desgaste, sin perder tenacidad en su núcleo.

La mezcla cementante que se utilizó está compuesta por 90% de carbón activado y 10% carbonato de sodio. Además, para el lecho fluidizado se usó argón. Se realizaron cuatro pruebas distintas de cementación, variando la temperatura y el tiempo. Así, se determinaron dos posibles combinaciones de estos parámetros como condiciones mínimas necesarias para el proceso de cementado propuesto: a 850 °C por 3 horas o a 900 °C por 2 horas.

El objetivo principal es asegurarse que bajo las condiciones sugeridas, el proceso se desarrolló satisfactoriamente. Esto se puede confirmar con los análisis de dureza y de profundidad total de la capa cementada. Primero, la profundidad total de la capa obtenida confirma que el proceso se desarrolló correctamente. El valor de la profundidad alcanzó más de 0.8 mm. La profundidad total se define como la distancia perpendicular desde el límite de la superficie hasta el final de la zona endurecida. Por otro lado, el aumento de dureza en todas las pruebas, con respecto al material suministrado inicialmente, corrobora la presencia de una capa con una concentración de carbono más alta.

Finalmente, además de asegurar que el proceso fue exitoso, es importante resaltar las ventajas de utilizar un lecho fluidizado. Esta técnica se convierte en una excelente alternativa para complementar el cementado, ya que se obtienen mejores resultados en cuanto a uniformidad y profundidad de capa cementada, tal como se demuestra en esta tesis.

## Abstract

This thesis project develops the pack carburizing process for low carbon steel by using a fluidized bed. This treatment aims to enrich the steel surface with carbon by diffusion. Therefore, a superficial layer with a higher carbon concentration than its core is achieved. As effect, the hardened steel acquires a useful combination of properties such as high surface hardness and wear resistance without losing toughness in its core.

The cementitious mixture used is composed of 90% of activated carbon and 10% of sodium carbonate. Additionally, argon was used for the fluidized bed. Four different cementation tests were carried out by temperature and time variations. Thus, two possible combinations of these parameters were identified as minimum conditions necessary for the proposed process of carburizing which are at 850 °C for 3 hours or at 900 °C for 2 hours.

The main objective is to ensure that the process is successfully developed under the suggested conditions. This can be confirmed by the hardness and total case hardening depth analysis. Regarding the total case hardening depth obtained, it affirms that the process has being carried out correctly, for the depth value reached over 0.8 mm. The total case hardening depth is defined as the perpendicular distance from the boundary surface to the end of the hardened area. Moreover, increased hardness in all tests regarding initial material supplied, confirms the presence of a layer with a higher carbon concentration.

Finally, besides making sure the process was successful, it is important to emphasize the benefits of using a fluidized bed. This technique makes it an excellent alternative to complement the carburizing process since better results are obtained in terms of uniformity and case hardening depth, as demonstrated in this thesis.

# Índice General

<b>Resumen</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>13</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>14</b>
1.1. Información preliminar del proyecto .....	14
1.2. Justificación del proyecto .....	15
1.3. Objetivos del proyecto .....	17
1.3.1. Objetivo general .....	17
1.3.2. Objetivos específicos .....	17
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>18</b>
2.1. Tratamientos térmicos en aceros .....	18
2.1.1. Tratamiento térmico de recocido .....	20
2.1.2. Tratamiento térmico de normalizado .....	20
2.1.3. Tratamientos térmicos de temple y revenido .....	21
2.2. Tratamientos termoquímicos en aceros .....	21
2.2.1. Cementado .....	22
2.2.1.1. Cementación líquida .....	24
2.2.1.2. Cementación gaseosa .....	24
2.2.1.3. Cementación sólida .....	25
2.3. Difusión .....	28
2.3.1. Métodos de difusión en una superficie endurecida .....	29
2.4. Fluidización .....	32
2.4.1. Lecho fluidizado en tratamientos térmicos .....	32
2.4.2. Gas protector en tratamientos térmicos .....	34
2.4.3. Ventajas del lecho fluidizado en tratamientos térmicos .....	35
2.5. Análisis de dureza .....	37
2.5.1. Ensayo de dureza Vickers .....	38
<b>3. Metodología &amp; Desarrollo Experimental</b>	<b>41</b>
3.1. Equipos utilizados para el tratamiento de cementado .....	41
3.1.1. Horno para tratamientos térmicos .....	41
3.1.2. Retorta para cementación por empaquetado con lecho fluidizado .....	<u>42</u>
3.2. Materiales .....	44
3.2.1. Carbón activado granular .....	45
3.2.2. Carbonato de sodio .....	45
3.2.3. Gas argón y válvulas de control .....	46
3.3. Ejecución del tratamiento de cementado .....	47
3.3.1. Acero de bajo carbono .....	47
3.3.2. Preparación de probetas .....	48
3.3.3. Procedimiento .....	49

3.3.4. Ensayos de cementado realizados .....	52
3.4. Análisis del tratamiento de cementado .....	53
3.4.1. Análisis de dureza .....	53
3.4.2. Análisis metalográfico .....	56
3.4.2.1. Montaje .....	57
3.4.2.2. Desbaste grueso .....	59
3.4.2.3. Desbaste fino .....	61
3.4.2.4. Ataque químico .....	63
3.4.2.5. Microscopio utilizado para análisis metalográfico ....	65
3.4.2.6. Profundidad de la capa cementada .....	66
<b>4. Resultados Experimentales y Discusiones</b>	<b>68</b>
4.1. Resultados y discusión de las mediciones de dureza .....	68
4.1.1. Mediciones de dureza .....	68
4.1.2. Discusión de resultados de dureza .....	71
4.2. Resultados y discusión de la capa cementada .....	72
4.2.1. Resultados de la profundidad total de la capa cementada ....	72
4.2.2. Discusión de resultados de la profundidad de la capa cementada .....	79
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>83</b>
5.1. Conclusiones .....	83
5.2. Recomendaciones .....	85
<b>6. Referencias Bibliográficas</b>	<b>87</b>



## Índice de Figuras

2.1.	Diagrama de fases hierro-carbono .....	19
2.2.	Cementación: cambio y mejoramiento de propiedades .....	22
2.3.	Esquema de la cementación por gas .....	25
2.4.	Esquema del cementado por empaquetado .....	27
2.5.	Profundidad de capa en el cementado por empaquetado .....	28
2.6.	Representación esquemática de la difusión intersticial .....	29
2.7.	Perfiles de concentración para la difusión en estado no estacionario obtenidos con 3 distintos tiempos, $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ .....	32
2.8.	Diagrama de un equipo para el uso de lecho fluidizado .....	33
2.9.	Diagrama de un equipo para el uso de lecho fluidizado .....	34
2.10.	Comparación de velocidad y uniformidad de transferencia de calor, entre un lecho fluidizado y la radiación ordinaria .....	35
2.11.	Comparación de tasas relativas de transferencia de calor en un lecho fluidizado y en otros medios .....	36
2.12.	Comparación de las distintas escalas de dureza .....	38
2.13.	Ensayo de dureza Vickers .....	39
3.1.	Horno para tratamientos térmicos Carbolite .....	41
3.2.	Gráfico de temperatura vs tiempo del horno Carbolite para tratamientos térmicos .....	42
3.3.	Retorta diseñada para tratamientos termoquímicos por medio sólido, utilizando lecho fluidizado .....	43
3.4.	Esquema de la entrada y salida de gases de la retorta en el lecho fluidizado .....	44
3.5.	Carbón activado granular Super CAG-900 Mesh 8x20 .....	45
3.6.	Carbonato de calcio .....	46
3.7.	Fluido de gas para el lecho fluidizado .....	46
3.8.	Acero de bajo carbono AISI 1018 .....	47
3.9.	Geometría de las probetas para cementación .....	48
3.10.	Probetas para cementación .....	48
3.11.	Instalación y conexión del equipo de cementado .....	49
3.12.	Componentes, mezcla y probetas en la retorta .....	50
3.13.	Retorta sellada para cementado sin lecho fluidizado .....	51
3.14.	Pruebas de cementación utilizando un lecho fluidizado .....	53
3.15.	Probetas cementadas con lecho fluidizado al sacarlas de la retorta, correspondientes al primer ensayo .....	53
3.16.	Equipo para análisis de dureza .....	54
3.17.	Ensayo de dureza Vickers .....	55
3.18.	Montaje en frío con resina .....	58
3.19.	Encapsulamiento en prensa con baquelita .....	58
3.20.	Desbaste grueso .....	60
3.21.	Superficie de las muestras tras pasar por el desbaste grueso .....	60
3.22.	Desbaste fino y superficie de muestra tras pasar por el mismo .....	62
3.23.	Ataque químico .....	64
3.24.	Microscopio ECLIPSE MA100 para el análisis metalográfico .....	65
3.25.	Análisis de una micrografía observada en uEye Cockpit .....	66

3.26.	Zona cementada observada en análisis metalográfico .....	67
4.1.	Gráfico comparativo de durezas obtenidas en los distintos ensayos de cementado que se realizaron con lecho fluidizado .....	70
4.2.	Límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Brinell vs concentración de carbono para aceros al carbono .....	71
4.3.	Micrografías a X100 de la probeta 1 (cementada con lecho fluidizado a 850 °C por 2 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 45 segundos .....	73
4.4.	Micrografías a X100 de la probeta 19 (cementada con lecho fluidizado a 850 °C por 3 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 15 segundos .....	74
4.5.	Micrografías a X100 de la probeta 22 (cementada con lecho fluidizado a 900 °C por 2 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 12 segundos .....	76
4.6.	Micrografías a X100 de la probeta 24 (cementada con lecho fluidizado a 900 °C por 3 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 10 segundos .....	77
4.7.	Gráfico comparativo de la profundidad total de las capas cementadas en las pruebas que se realizaron con lecho fluidizado ...	78
4.8.	Profundidad total de la capa en el cementado por empaquetado con fluidización entre 2 y 3 horas para 850 y 900 °C .....	79
4.9.	Efecto del tiempo en la profundidad de la capa en un cementado por empaquetado a 925 °C (1700 °F) .....	80
4.10.	Perfiles de concentración de carbono durante las cuatro pruebas de cementación .....	81

## Índice de Tablas

2.1	Composición de algunos compuestos para cementación sólida .....	26
3.1	Ensayos de cementado realizados con lecho fluidizado .....	52
3.2	Ensayos de cementado realizados sin lecho fluidizado .....	52
4.1	Dureza del acero AISI 1018 sin cementar .....	68
4.2	Dureza del acero AISI 1018 cementado a 850 °C - 2 horas .....	69
4.3	Dureza del acero AISI 1018 cementado a 850 °C - 3 horas .....	69
4.4	Dureza del acero AISI 1018 cementado a 900 °C - 2 horas .....	69
4.5	Dureza del acero AISI 1018 cementado a 900 °C - 3 horas .....	70
4.6	Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 850 °C por 2 horas .....	73
4.7	Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 850 °C por 3 horas .....	75
4.8	Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 900 °C por 2 horas .....	76
4.9	Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 900 °C por 3 horas .....	78
4.10	Características de un caso típico de cementado por empaquetado sin fluidización .....	79

## Nomenclatura

$Fe$	Símbolo del hierro
$C$	Símbolo del carbono
$Na_2CO_3$	Fórmula del carbonato de sodio
$\%C$	Porcentaje de carbono en la mezcla de cementación
$\%Na_2CO_3$	Porcentaje de carbonato de sodio en la mezcla de cementación
1018	Nomenclatura del acero al carbono que tiene 0.18% de carbono
<i>in.</i>	Pulgada (inche), medida de longitud en el sistema inglés
<i>mm.</i>	Milímetro, medida de longitud en el sistema internacional
<i>HRC</i>	Medida de dureza en escala Rockwell C
<i>HV</i>	Medida de dureza en escala Vickers
$\sigma$	Letra griega sigma, representa la medida de desviación estándar
$NaCN$	Fórmula del cianuro de sodio
$NaCl$	Fórmula del cloruro de sodio
$KCl$	Fórmula del cloruro de potasio
$CH_4$	Fórmula del metano
$C_3H_8$	Fórmula del propano
$N_2$	Fórmula molecular del nitrógeno en estado gaseoso
$H_2$	Fórmula molecular del hidrógeno en estado gaseoso
$Na_2O$	Fórmula del óxido de sodio
$BaCO_3$	Fórmula del carbonato de bario
$CaCO_3$	Fórmula del carbonato de calcio
$K_2CO_3$	Fórmula del carbonato de potasio
$CO_2$	Fórmula del dióxido de carbono
$CO$	Fórmula del monóxido de carbono
<i>rev/min</i>	Unidad de frecuencia para expresar una velocidad angular (Revoluciones por minuto)
$HNO_3$	Fórmula del ácido nítrico

# **1. Introducción**

## **1.1. Información preliminar del proyecto**

Con el fin de mejorar las características y propiedades de los metales, los tratamientos térmicos se han venido utilizando desde hace mucho tiempo y son una parte fundamental de la industria. Existen diversos tipos de tratamientos que van a endurecer, ablandar, eliminar tensiones provocadas por una forja o un mecanizado, o modificar (total o parcialmente) la estructura cristalina de un metal [1]. El proceso que se vaya a realizar dependerá de los atributos que se quiera obtener en el metal que se va a tratar, de tal manera que el mismo tenga las propiedades adecuadas para ser utilizarlo en cualquier proceso de producción que se lleve a cabo.

Básicamente, los metales a los que se les aplica un tratamiento térmico son el acero y las fundiciones, es decir, materiales formados por hierro y carbono. Todos los tratamientos térmicos son procesos que involucran el calentamiento y enfriamiento de un metal, en cada uno de ellos se podrá controlar varios factores como la temperatura, tiempo o velocidad. De esta forma, se puede conseguir varias características mecánicas como la tenacidad, maquinabilidad, resistencia al desgaste o dureza [2].

Entre los tratamientos más utilizados están el recocido, templado, revenido y normalizado, en estos cuatro procesos no existe un cambio en la composición química del metal sino, solamente en su estructura. Por otro lado, dentro de los tratamientos térmicos se encuentran los tratamientos termoquímicos, donde sí existe un cambio en la composición química de la capa superficial del metal, además del cambio estructural del mismo [3]. Entre los principales tratamientos

termoquímicos, por nombrar algunos, están el nitrurado, cianurado, cromado y cementado. Este estudio se centrará en este último, el cementado.

El proceso de cementación, también conocido como carburización o carburación, es un tratamiento termoquímico que consiste en el endurecimiento superficial de un acero de bajo carbono (menor o igual al 0.20 %C) [4]. Con el proceso de cementado, se puede aumentar la dureza en la superficie (parte cementada) del acero sin afectar su núcleo (parte sin cementar), lo cual resulta conveniente ya que el acero no dejará de ser dúctil en su interior a pesar de haber endurecido la parte externa [5].

Existen tres principales tipos de cementado: por empaquetado, en baños líquidos y por gas. Además, existen técnicas que pueden complementar el proceso de cementado como el uso de fluidización o el cementado al vacío. Este proyecto se enfocará, particularmente, en el cementado por empaquetado utilizando un lecho fluidizado. Este proceso, mediante difusión, utiliza cementante, en estado sólido, para endurecer superficialmente a la pieza de acero.

## **1.2. Justificación del proyecto**

En la actualidad, los tratamientos térmicos en metales vienen siendo parte fundamental de la industria. En los distintos procesos de manufactura que se llevan a cabo, ya sea en procesos de fabricación final o previo a otros posteriores, los tratamientos térmicos tienen como fin entregarle al metal una característica particular para conseguir condiciones favorables y apropiadas para el uso que se le dará al mismo.

Por ejemplo, en varias piezas mecánicas, algunas de las propiedades que se quiere alcanzar en las mismas son dureza y tenacidad, para obtener una buena

resistencia al desgaste y, al mismo tiempo, tener ductilidad y resistencia a la fatiga; que son cualidades propias de llevar a cabo un proceso de cementado [6]. Lograr que una pieza posea estas características resulta conveniente no solo para aumentar el rendimiento de la misma, sino también para que esta desempeñe un trabajo adecuado en la aplicación que ejecute.

Engranajes, álabes, tornillos, rodamientos, brocas, arandelas; son algunos de los componentes mecánicos más usados, en las distintas industrias, que han sido sometidos a un tratamiento de cementado para que cumplan su función de manera óptima [7].

Actualmente, dentro de la industria ecuatoriana, estas y otras unidades mecánicas son usadas con frecuencia. Sin embargo, estas piezas no siempre pasan por un proceso adecuado para conseguir que su aplicación sea realizada eficientemente. Ciertos fabricantes pasan por alto las ventajas que podrían obtener en su producto con un tratamiento de cementado, esto se debe al desconocimiento que tienen al respecto o porque la implementación de este proceso está fuera de su presupuesto.

Los procesos de cementado aplicados en las grandes industrias, se llevan a cabo de manera automatizada, de esta forma varios o todos los parámetros del proceso pueden ser controlados y así obtener mejores resultados. A pesar de los beneficios que se obtiene con un proceso automático, la inversión para poder implementarlo es alta, es por eso que muchos fabricantes desisten de realizar este proceso, y mucho más a que este sea automatizado. Por esta razón, el cementado por empaquetado mediante fluidización viene a convertirse en una excelente alternativa debido a que es un proceso fácil de implementar, de bajo costo y que entrega buenos resultados. Este proyecto busca encontrar las

condiciones necesarias para llevar a cabo este proceso apropiadamente y que se convierta en referencia para aquellos que estén interesados en implementar el mismo.

### **1.3. Objetivos del proyecto**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Desarrollo del tratamiento termoquímico de cementado por empaquetado mediante fluidización para el endurecimiento de la superficie de un metal.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Realizar pruebas del proceso de cementado utilizando un lecho fluidizado.
- Realizar pruebas con distintas condiciones de temperatura y tiempo.
- Comprobar las propiedades obtenidas en cada probeta después de haber aplicado el tratamiento.
- Realizar un análisis metalográfico para analizar la microestructura de las probetas que han sido sometidas al tratamiento.
- Comparación de resultados de las distintas pruebas para la determinación de las condiciones y composición de la mezcla apropiadas para que el proceso de cementado sea óptimo.



## **2. Marco Teórico**

El acero es una aleación metálica conformada, principalmente, por hierro (Fe) y carbono (C), aunque puede contener otros componentes. El contenido de carbono que posee el acero varía entre 0.02% y 2.11% [4]. El acero es uno de los productos de manufactura más utilizados en el campo de la ingeniería. La variedad de propiedades físicas y mecánicas que se pueden conseguir en un acero, debido a la gran capacidad de adaptación que tiene el mismo, permiten el diseño y la fabricación de una gran variedad de componentes utilizados en la industria.

Los aceros, como materia prima, pasan a ser partes y productos útiles en la industria después de pasar por diversos procesos de manufactura, entre los que se encuentran los tratamientos térmicos. Todos estos tienen distinto propósito, todo va a depender de lo que se requiera. A continuación se describirá brevemente cada uno de estos tratamientos a los que son sometidos los aceros y, finalmente, se profundizará el proceso que es de interés en este proyecto, el cementado.

### **2.1. Tratamientos térmicos en aceros**

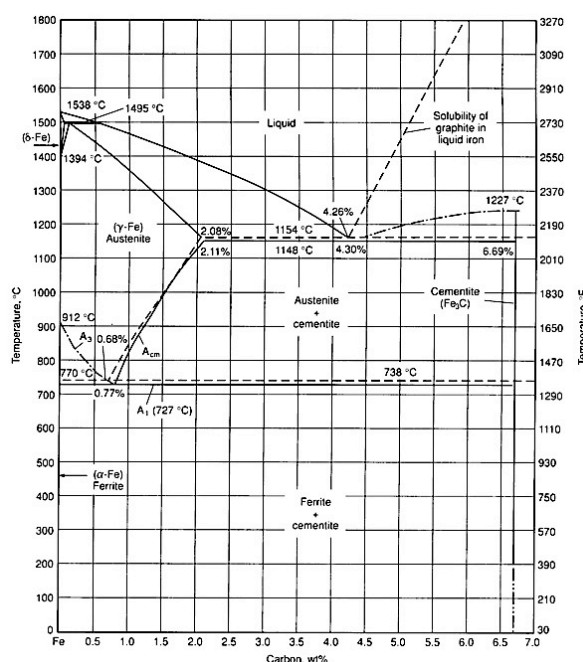
Los metales y sus aleaciones son la base para la fabricación de máquinas y equipos para las distintas ramas de la industria. Es imposible elevar la calidad, confiabilidad y plazo de servicio de una maquinaria sin dar a los materiales metálicos propiedades especiales, lo cual se logra modificando la microestructura del material, y esto se consigue a través de los tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos se han venido utilizando como una herramienta para entregarle propiedades adecuadas que necesita el metal en un proceso de

producción [8]. Básicamente, estos procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento del material en su estado sólido, es decir, calentar el acero hasta una temperatura determinada y mantener la misma por un tiempo establecido, para posteriormente enfriarlo a una velocidad conveniente [9].

La reducción de esfuerzos internos y del tamaño del grano, el incremento de la tenacidad o, conseguir una pieza con una superficie dura sin perder ductilidad en su núcleo; son algunas de las propiedades que se pueden cambiar con el tratamiento térmico. Para esto, es importante saber interpretar los diagramas de fase, para este caso particular será el de hierro-carbono (ver Figura 2.1), este indica los cambios de fases de la estructura y las temperaturas cuando ocurren los mismos [10].

Un tratamiento apropiado dependerá, principalmente, de la correcta utilización de los parámetros que se pueden controlar: tiempo y temperatura; según la composición del acero, la forma y el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener.



**Figura 2.1.** Diagrama de Equilibrio o de Fases Hierro-Carbono. Fuente [11].

### **2.1.1. Tratamiento térmico de recocido**

El recocido es un proceso que tiene como objetivo la homogeneización de la estructura y composición química del acero, con el fin de ablandar el material y que este sea más dúctil. Fundamentalmente, este tratamiento consiste en calentar el metal hasta una temperatura establecida, sostener la misma por un tiempo determinado, y finalmente enfriarlo lentamente hasta una temperatura ambiente [12].

Existen, principalmente, cuatro tipos de recocido: de regeneración, de homogeneización, de globalización y subcrítico. Se diferencian por tener distinta temperatura de recocido y el fin que tenga el mismo [13]. Hay que mencionar que dentro de estos tipos de recocido se encuentran otros que son más específicos o que fusionan dos o más procesos en uno solo. Por ejemplo, dentro del subcrítico se pueden encontrar el 'recocido por tratamiento' (process annealing) y el de alivio de tensiones, ambos se pueden aplicar a los aceros de bajo carbono (acero hipoeutectoide) para liberar tensiones de trabajos anteriores [2, 3, 14].

Este tratamiento no proporciona las condiciones finales para su utilización, es por eso que funciona como un tratamiento previo al proceso final, o posterior al mismo [15, 16, 17]. Para este proyecto, cumplirá la función de un precalentamiento antes del proceso de cementado.

### **2.1.2. Tratamiento térmico de normalizado**

El normalizado es un tratamiento para alcanzar el estado natural del material, es decir, libre de tensiones y con una estructura uniforme. Este estado se puede obtener calentando el metal sobre su temperatura crítica, sosteniendo la misma por un tiempo fijado y enfriándolo al aire libre [3, 15].

### **2.1.3. Tratamientos térmicos de temple y revenido**

El temple tiene como finalidad el endurecimiento y una mayor resistencia mecánica del material. El tratamiento consiste de un calentamiento hasta una temperatura de austenización adecuada y un enfriamiento rápido o “brusco” (en agua, aceite o líquidos refrigerantes). Por otro lado, el revenido es un proceso que va de la mano con el temple y se aplica tras el mismo con el fin de mejorar sus efectos y eliminar las tensiones que ha dejado por el cambio súbito de temperatura. Este proceso complementario se lleva a cabo calentando el acero hasta una temperatura inferior a la crítica, o de austenización, y enfriándolo en el horno o al aire [16, 18].

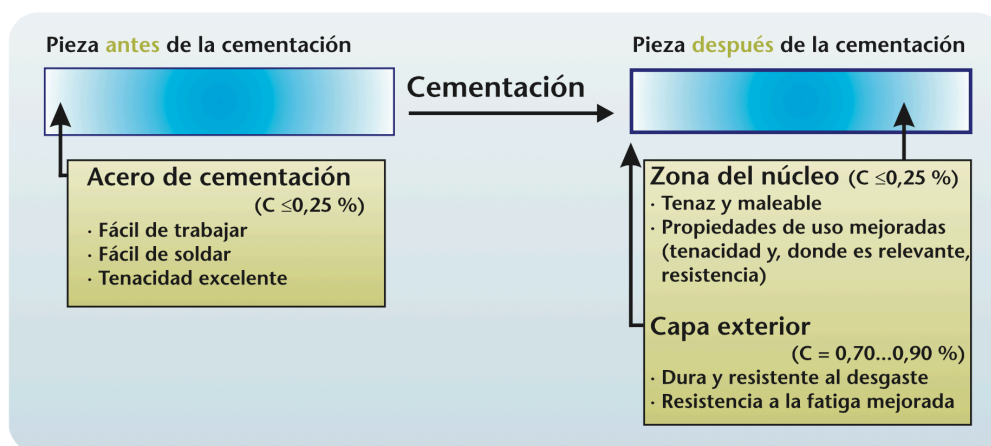
Además, en otros casos, ambos procesos concluyen otro tipo de tratamientos, como el cementado. Por ejemplo, en el caso de los tratamientos termoquímicos, es necesario que después del mismo se haga un temple y revenido a la pieza para poder conseguir que el material tenga las condiciones finales para su utilización y que cuente con las propiedades que se mencionó antes [3, 7, 19].

## **2.2. Tratamientos termoquímicos en aceros**

Los tratamientos termoquímicos se llevan a cabo con el aporte de calor al acero en una atmósfera controlada. Este tratamiento es de recubrimiento superficial, donde se agrega un componente hasta una profundidad determinada, es decir, que hay una deposición de otro elemento en la superficie del material a través de difusión. De esta forma, como se mencionó antes, no solo se altera la estructura del material, sino también la composición química en la superficie del mismo. Los tratamiento termoquímicos más comunes son el cementado, nitrurado y cianurado [9, 20]. Este proyecto se centrará únicamente en el cementado.

### 2.2.1. Cementado

El cementado es un tratamiento de endurecimiento superficial, ideal para aceros de bajo carbono, en el cual el carbón se difunde en la capa superficial de la pieza de acero a una temperatura lo suficientemente alta como para cambiar su estructura en su estado austenítico, estado en el cual es posible la absorción del carbón. El resultado del tratamiento será la obtención de un acero con una capa superficial endurecida, resistente al desgaste, y que conserva la resistencia y tenacidad en su núcleo [21, 22].



**Figura 2.2.** Cementación: cambio y mejoramiento de propiedades. Fuente [7].

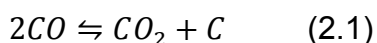
La temperatura a la que generalmente ocurre la difusión, cuando la austenita es la estructura cristalina estable del acero, varía entre 850 °C y 950 °C, esto se puede observar en el diagrama de fases hierro-carbono que se muestra en la Figura 2.1. Por otro lado, el endurecimiento se consigue cuando la capa superficial, enriquecida en carbono, se enfría para formar martensita. Teniendo así una superficie martensítica con alto contenido de carbono, resistente al desgaste y a la fatiga, y que envuelve a un núcleo dúctil de bajo carbono [23].

El espesor de la capa superficial de cementado dependerá del tiempo de

carburización y el potencial de carbono disponible en la superficie. Mayores tiempos de cementado producirán capas más profundas. Sin embargo, un tiempo prolongado, que puede producir una superficie alta en carbono, puede resultar inadecuado debido a que se podría obtener un exceso de austenita retenida y un efecto adverso en la distribución de tensiones residuales en la parte endurecida. Por lo tanto, es importante escoger un potencial de carbono adecuado, alto para tiempos cortos y bajo para tiempos prolongados. Generalmente, el contenido de carbono en la capa cementada se limita a 0.90 %C [23].

Básicamente, el cementado es un proceso de tiempo, temperatura y potencial de carbono. Un criterio adecuado para controlar estos parámetros determinará el espesor de la capa de cementación. Existen varios procesos para realizar este tratamiento, pero los que se usan con mayor frecuencia son: cementación sólida, líquida y gaseosa.

Cada una de estas técnicas poseen un método de carburización diferente, es decir, tienen distintas cinéticas de reacción en la superficie y, por ende, distintos resultados. Sin embargo, estos tres métodos convencionales ocurren en la fase gaseosa del monóxido de carbono, es decir, cuando este se descompone en la superficie del acero, tal como describe la Ecuación 2.1. [23]



Se puede observar que el carbono liberado, que se disolverá fácilmente en la fase austenítica, se difunde en todo el acero y, por otro lado, el dióxido de carbono producido puede reaccionar con la atmósfera de carbono, o con el mismo carbón, para producir nuevo monóxido de carbono, esto ocurre en la reacción

inversa de la ecuación. El hecho de que la reacción pueda ocurrir en ambas direcciones, quiere decir que existe una relación de equilibrio entre los componentes [23].

#### **2.2.1.1. Cementación líquida**

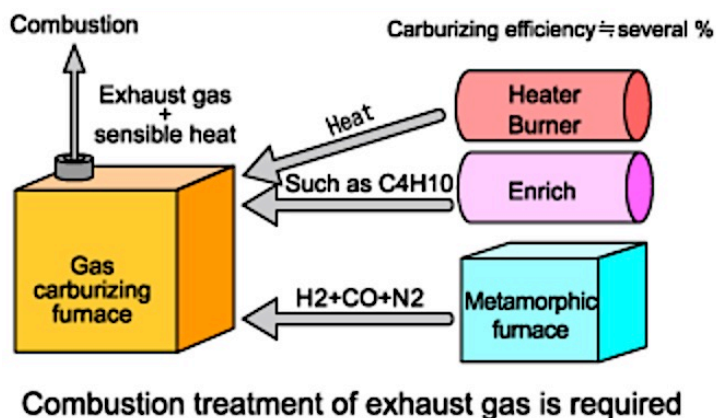
Este proceso se lleva a cabo por medio de un baño de sales fundidas, donde las partes que se van a cementar son sumergidas en el líquido a una temperatura superior a la de austenización, como se mencionó anteriormente, y por un tiempo determinado. Tras producirse varias reacciones con el aire, el baño de sales difundirá el carbono y el nitrógeno, o solo carbono, en el metal [24, 25].

El baño de sales está compuesto principalmente por cianuro de sodio líquido ( $\text{NaCN}$ ) y otros elementos como carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), cloruro de potasio ( $\text{KCl}$ ), entre otras sales de otros metales. Por otro lado, el rango de temperatura que se utiliza en este método está entre 815 y 955 °C, dependiendo de la composición del baño. Y el tiempo que la pieza metálica debe permanecer sumergida en el líquido será entre 15 minutos y hasta 1 hora, según la profundidad de la capa de cementación que se requiera [23, 26].

#### **2.2.1.2. Cementación gaseosa**

Este método se lleva a cabo utilizando gases carburizantes. El cementado por gas utiliza un horno de mufla en el cual se crea una atmósfera rica en carbono creada, ya sea con hidrocarburos gaseosos como el metano ( $\text{CH}_4$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) o butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ); o por líquidos hidrocarburos vaporizados. La atmósfera cementante se producirá por la mezcla entre un gas portador y un gas enriquecedor (que servirá como fuente de carbono). El gas portador, también conocido como gas endotérmico (endogas), está compuesto por monóxido de

carbono (CO), hidrógeno ( $H_2$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ); y reaccionará con el gas enriquecedor, o gas activo, que será uno de los hidrocarburos gaseosos que se nombró anteriormente [23].



**Figura 2.3.** Esquema de la cementación por gas. Fuente [27].

El cementado por gas es posible por la descomposición del gas enriquecedor a alta temperatura, produciendo carbón naciente que será absorbido por el acero en etapa de austenización. Además, el monóxido de carbono, que contiene el gas portador, también se descompondrá y favorece al proceso al liberar más carbono [6], tal como se indicó en la Ecuación 2.1.

Al igual que el anterior método, este procedimiento se desarrolla por medio de difusión. Se calienta el metal hasta una temperatura entre los 870 y 950 °C y permanece a esa temperatura por un tiempo adecuado, dependiendo del espesor de capa cementada que se desee obtener [28].

### 2.2.1.3. Cementación sólida

Este tipo de cementado es también conocido como cementado por empaquetado (pack carburizing). Este método utiliza un horno y se lleva a cabo en un recipiente sellado que contiene una mezcla de compuestos sólidos que al reaccionar favorecerán el proceso.



El material carburizante que se utiliza para este tipo de cementado es reusable y será la fuente de carbono para el proceso. Entre los carburizantes que más se utilizan para este proceso están el carbón vegetal, carbón de madera, coque, o carbón activado. Por otro lado, utilizando solamente el carburizante no se obtiene buenos resultados, por lo que es necesario el uso de un energizante o activador, que funcionará como un catalizador para acelerar el proceso. Los energizantes que se usan, en una proporción definida, son el carbonato de bario ( $\text{BaCO}_3$ ), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y también se puede usar el carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) [23, 29, 30, 31, 32].

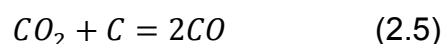
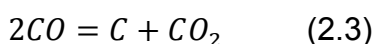
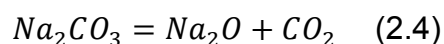
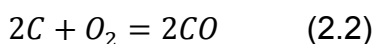
Existen distintas combinaciones para elaborar la mezcla cementante, la misma que contendrá al material portador de carbono y al activador. Por ejemplo, la siguiente tabla muestra tres posibles combinaciones para la mezcla:

**Tabla 2.1.** Composición de algunos compuestos para cementación sólida.  
Fuente [33].

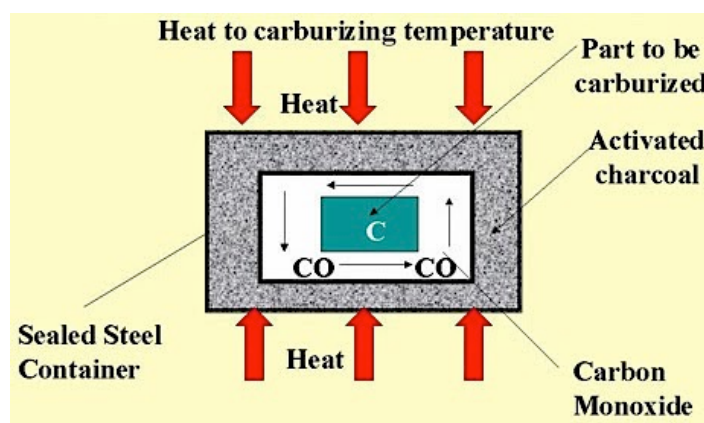
Cementación	Ingredientes	Partes por peso
Compuesto no. 1	Carbón	90
	Carbonato de sodio	10
Compuesto no. 2	Carbonato de bario + carbón ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ + aglutinante o $\text{BaCO}_3$ )	10 + 90 4%
Compuesto no.3	Carbón	50
	Coque	30
	Carbonato de bario	12%
	Carbonato de sodio	3
	Carbonato de calcio	3
	Aglutinante	2

Los componentes usados para el proceso, al calentarse, desprenderán gases

debido a las reacciones químicas que se producen a esas condiciones. Es decir, que a pesar de que los materiales estén en estado sólido, la difusión del carbón en el interior del acero ocurre debido a los gases que se forman [13]. A temperaturas altas, el oxígeno reaccionará con el carbón que se encuentra en la mezcla para generar monóxido de carbono (CO) que se descompondrá, en la superficie del metal, en carbono naciente y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); así mismo, el activador, suponiendo que se utiliza carbonato de sodio, se va a descomponer en óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O) y dióxido de carbono, y este último, nuevamente, en monóxido de carbono tal como se observa en las siguientes ecuaciones [6, 28, 31, 33]:

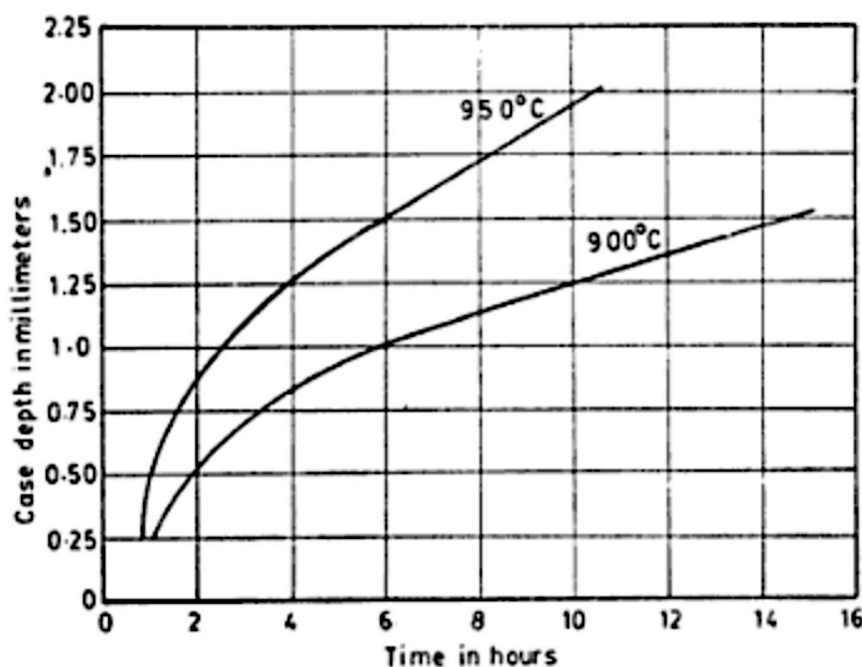


Como se observa, durante el proceso de cementación, donde la pieza a cementar está rodeada del carburizante y del activador, las reacciones que se producen van a formar monóxido de carbono, que es el compuesto que va a reaccionar con la superficie del acero de bajo carbono que se está cementando (ver Figura 2.4.).



**Figura 2.4.** Esquema del cementado por empaquetado. Fuente [6].

Por otro lado, el cementado se lo hace a temperaturas que varían entre 815 y 955 °C. Sin embargo, actualmente también se utilizan temperaturas sobre los 1000 °C. Por último, el tiempo y temperatura empleados en este proceso va a depender de los resultados que se desee obtener, es decir, qué tan profunda se quiere que sea la capa de cementación [23]. Si se requiere una capa de cementación más gruesa, mayor deberá ser el tiempo o la temperatura de cementado. Para entenderlo mejor, la Figura 2.5 indica un ejemplo de el efecto que tiene el tiempo, a determinada temperatura, en la profundidad de la capa de cementación:



**Figura 2.5.** Profundidad de capa en el cementado por empaquetado. Fuente [33].

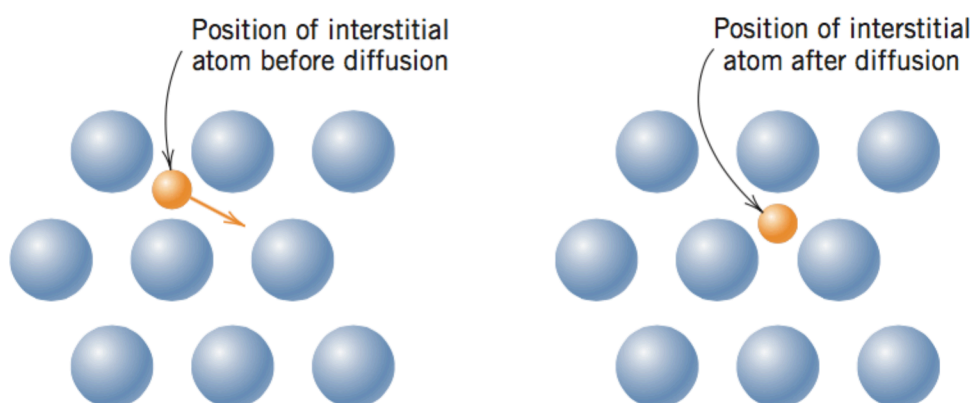
### 2.3. Difusión

La difusión es un fenómeno de transporte por movimiento atómico y consiste en la migración de partículas desde un área con mayor concentración hacia una de menor, de esta manera, se logra una distribución uniforme de la sustancia. A una

temperatura específica, una fracción del número total de átomos es capaz de difundirse debido a la magnitud de su energía de vibración, esta fracción aumenta al ascender la temperatura [34, 35].

### 2.3.1. Métodos de difusión en una superficie endurecida

Existen dos mecanismos de difusión, por vacantes e intersticial. El mecanismo que se relaciona con el proceso de cementado es la difusión intersticial, que tiene lugar por interdifusión de solutos como el carbono. En la difusión por intersticios, los átomos se trasladan desde una posición intersticial hacia otra vecina desocupada (ver Figura 2.6.).



**Figura 2.6.** Representación esquemática de la difusión intersticial. Fuente [34].

Originalmente, el átomo se encuentra en un estado relativamente estable y en un sitio de baja energía. Es por eso, que para que se produzca este movimiento difusivo ordenado, que tiende a formar una composición homogénea, se requiere una energía de activación capaz de vencer la barrera que un átomo tiene para desplazarse. La energía de activación que un átomo necesita para desplazarse es proporcionada por el calor [36].

En la mayoría de casos, la difusión intersticial ocurre más rápido que en el otro

mecanismo debido a que los átomos intersticiales son más pequeños que las vacantes y tienen una mayor probabilidad de movilidad atómica, ya que existen más posiciones intersticiales vacías que vacantes. Por otro lado, la difusión es un proceso que va a depender del tiempo, por esta razón es importante analizar el comportamiento del flujo de difusión. Según el tipo de flujo que se tenga, la difusión puede ocurrir de dos maneras distintas: en estado estacionario (flujo constante) y en estado no estacionario (flujo variable). En la práctica, este fenómeno ocurre en estado no estacionario, donde el flujo y gradiente de difusión varían con el tiempo, es decir, que la concentración de los átomos del soluto, en cualquier punto del material, no es constante. Esto es precisamente lo que expresa la Segunda Ley de Fick (Ecuación 2.6.) [34, 37].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.6)$$

Como se observa en la ecuación diferencial, la concentración ( $C$ ) varía con el tiempo ( $t$ ) y por tanto, también será diferente a cualquier distancia ( $x$ ) que se considere desde la superficie del material. Además, es apropiado considerar que el coeficiente de difusión ( $D$ ) es independiente de la distancia y concentración; de esta forma se puede llegar a una ecuación simplificada de la Segunda Ley de Fick (Ecuación 2.7.).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

Considerando las condiciones apropiadas: 1) antes de la difusión, todos los átomos del soluto están distribuidos uniformemente en el sólido con la

concentración inicial del mismo, 2) el valor de la distancia en la superficie es cero y aumenta hacia el núcleo del sólido, y 3) en el instante justo antes de que comience el proceso de difusión, el tiempo será cero; una solución conveniente, de la Segunda Ley de Fick, para aplicarla en el proceso de cementado es la propuesta por Van-Ostrand Dewey que puede ser escrita de la siguiente manera (Ecuación 2.8.) [34, 38]:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.8)$$

Donde:  $C_x$  = Concentración de carbono en función de la distancia  $x$ .

$C_s$  = Concentración de carbono en la superficie.

$C_0$  = Concentración de carbono inicial en el sólido.

$\operatorname{erf}$  = Función error.

$D$  = Coeficiente de difusión.

$x$  = Distancia desde la superficie

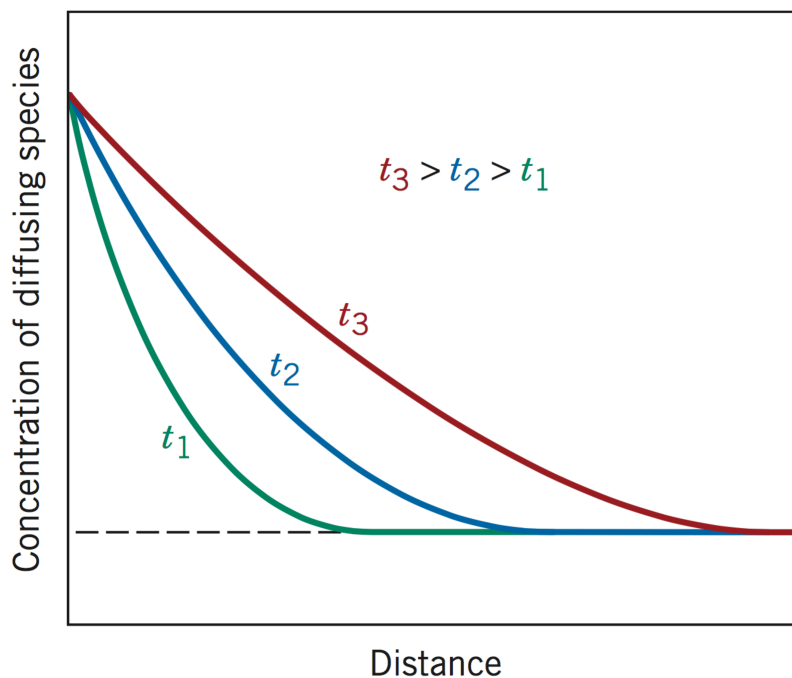
$t$  = tiempo

Para:  $t = 0, C = C_0$  en  $0 \leq x \leq \infty$

$t > 0, C = C_s$  en  $x = 0$

$C = C_0$  en  $0 \leq x \leq \infty$

Este mecanismo de difusión, como se había mencionado, va a modificar la composición química de una superficie con elementos de endurecimiento como el carbono. Es por eso que en la cementación y en otros tratamientos termoquímicos de endurecimiento superficial, se puede aplicar la Segunda Ley de Fick para obtener un perfil de concentración y poder determinar la profundidad de la capa endurecida por difusión [37] (ver Figura 2.7.).



**Figura 2.7.** Perfiles de concentración para la difusión en estado no estacionario obtenidos con 3 distintos tiempos,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . Fuente [34].

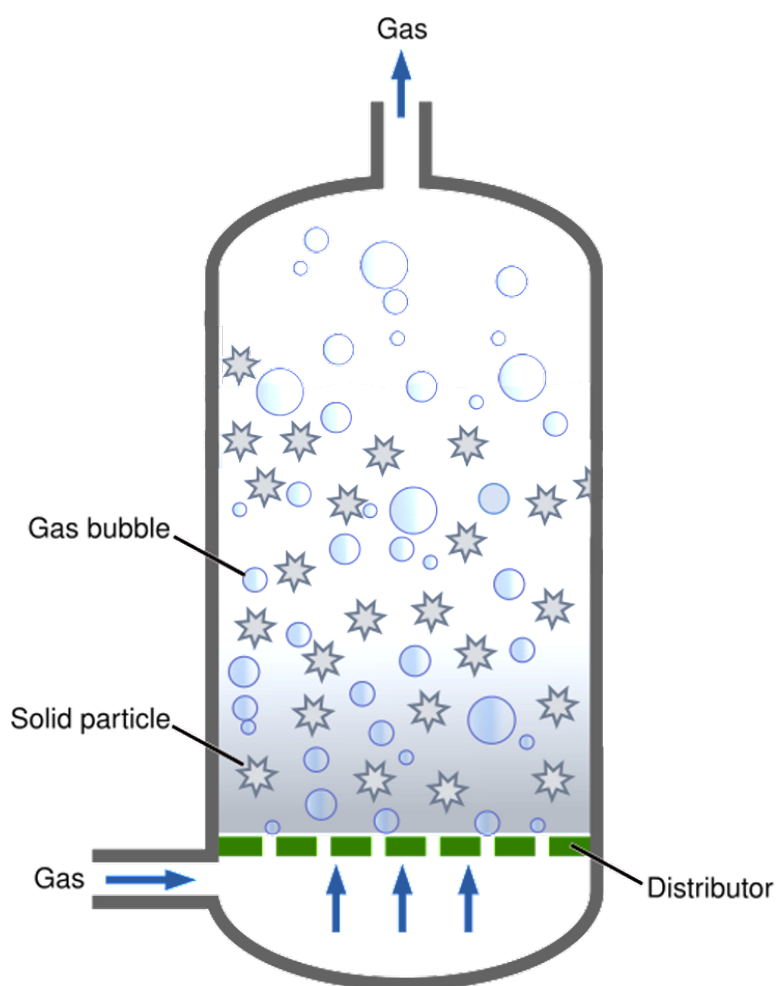
## 2.4. Fluidización

Anteriormente se había mencionado los tres métodos de cementación más comunes. Sin embargo, existen técnicas que pueden complementar dichos métodos con el fin de conseguir mejores resultados. Una de las alternativas para mejorar el proceso de cementado es la fluidización. Esta técnica consiste en la utilización de un fluido para suspender en el espacio, mediante una corriente ascendente, las partículas sólidas. El fluido agitará la mezcla hasta que la misma sea homogénea. Al conjunto de partículas sólidas suspendidas se lo conoce como lecho fluidizado [39].

### 2.4.1. Lecho fluidizado en tratamientos térmicos

Existen distintos equipos para poder llevar a cabo este proceso, uno de ellos

puede ser una retorta diseñada para utilizar un lecho fluidizado. De tal forma, que un gas circule desde el fondo, a una velocidad suficientemente alta, para que el material que inicialmente se encuentra en la retorta sea llevado a un estado de fluidización, es decir, que el lecho se comporte como un líquido [40, 41].



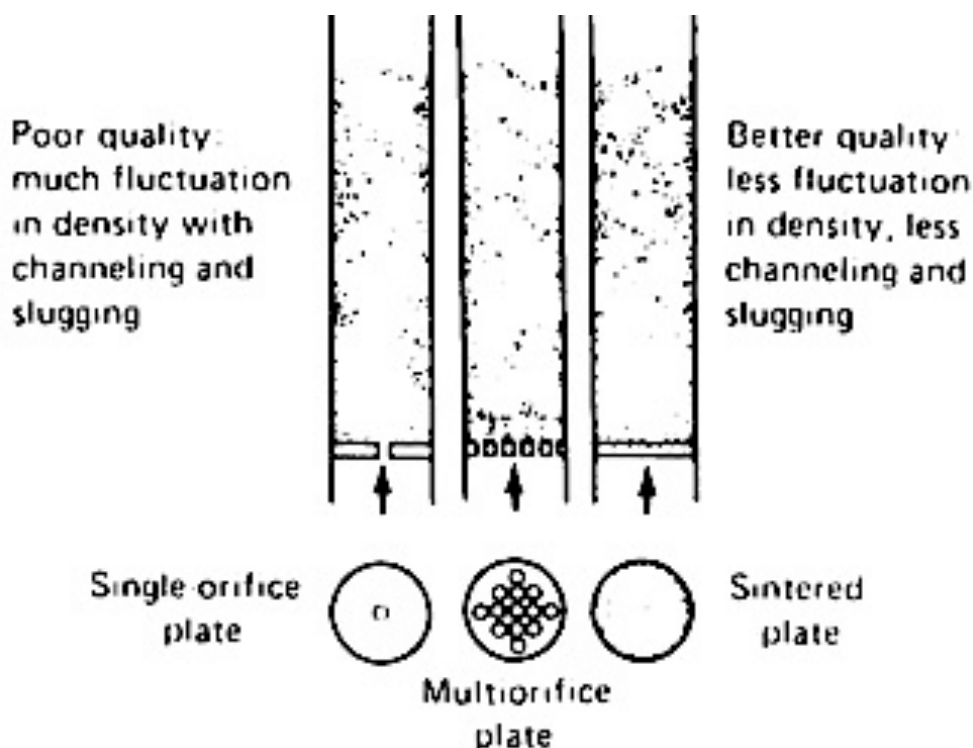
**Figura 2.8.** Diagrama de un equipo para el uso de lecho fluidizado. Fuente [42].

Existen distintos tipos o etapas de fluidización que se diferencian por las características del lecho y del flujo. Por lo general, en un tratamiento termoquímico se utiliza la fluidización agregativa o de burbujeo. En esta etapa, la mayor parte del gas atraviesa el lecho en forma de burbujas [39]. Para que este estado de fluidización ocurra, es importante que el flujo del gas alcance una



velocidad denominada como *velocidad mínima de burbujeo*, pues en ese momento aparecerán las burbujas que fluidizarán el lecho de manera heterogénea [43].

Por otro lado, es muy importante considerar la uniformidad en la distribución del flujo. Este factor influirá mucho en la calidad de la fluidización y puede ser controlado con el diseño del distribuidor de gas. Un distribuidor con varios orificios, para la entrada del gas, tendrá una repartición del fluido más eficaz que el de una sola entrada, tal como lo se puede observar en la Figura 2.9.



**Figura 2.9.** Diagrama de un equipo para el uso de lecho fluidizado. Fuente [23].

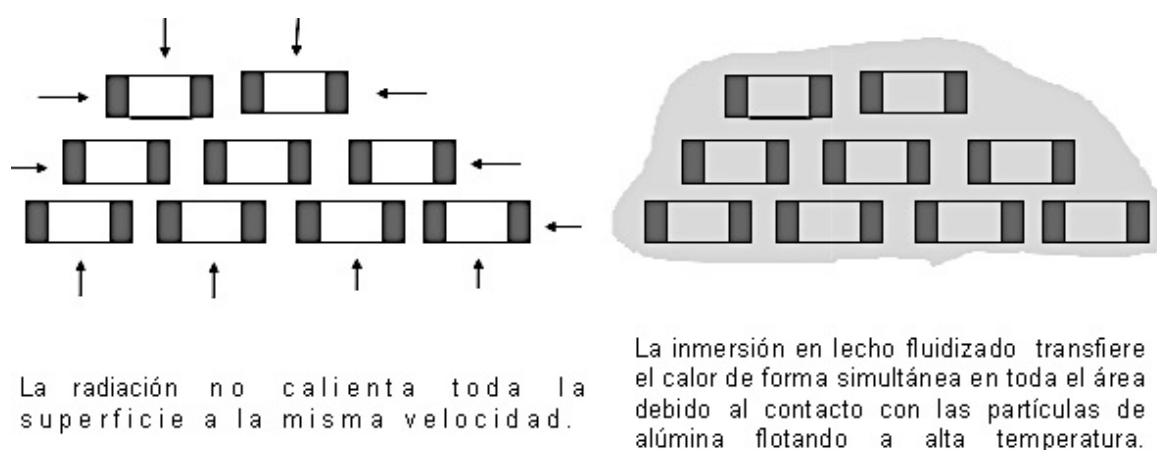
#### 2.4.2. Gas protector en tratamientos térmicos

El lecho fluidizado permite realizar tratamientos superficiales como el cementado. Para esto es importante seleccionar una atmósfera apropiada, esto se consigue utilizando un fluido adecuado, que puede ser un gas. Este tendrá que ser un

componente inerte, que no forme compuestos químicos y, que no reaccione salvo en condiciones muy extremas y especiales. El argón es uno de los gases que se utiliza en los tratamientos térmicos [44, 45] debido a que es un gas inerte, neutro, que no interactúa químicamente con otros componentes. Además, el Argón va a actuar como un gas protector, ya que impedirá la entrada de oxígeno a la atmósfera, evitando la oxidación y descarbonización durante el tratamiento térmico [46]. De esta forma, se puede seguir manteniendo una atmósfera controlada sin tener que preocuparse por el efecto del gas utilizado para la fluidización.

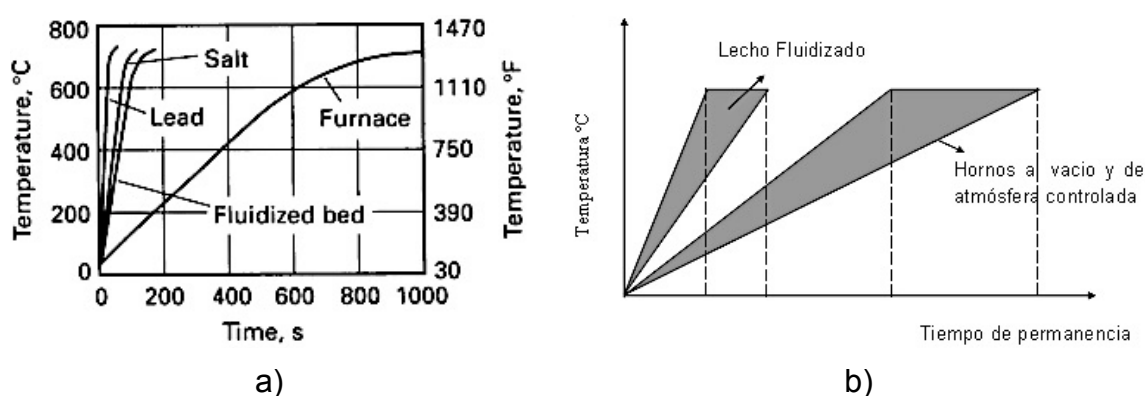
#### 2.4.3. Ventajas del lecho fluidizado en tratamientos térmicos

Las ventajas que entrega la utilización del lecho fluidizado en un tratamiento térmico lo convierte en un método muy conveniente. Primero, el lecho fluidizado posee una excelente uniformidad térmica en toda la superficie de todas las piezas tratadas, indistintamente de sus forma y tamaños, al contrario de lo que ocurre en hornos al vacío o de atmósfera controlada. Esto hace que se obtenga una gran uniformidad en la dureza de todas las piezas procesadas.



**Figura 2.10.** Comparación de velocidad y uniformidad de transferencia de calor, entre un lecho fluidizado y la radiación ordinaria. Fuente [47].

Segundo, se asegura que no ocurra una descarburización, lo cual evitará que la composición química superficial se modifique y que se obtenga una estructura granular indeseada. Además, uno de los mayores beneficios que se obtiene al emplear un lecho fluidizado, es que se puede llevar a cabo este tratamiento térmico en menos tiempo. La alta temperatura hace posible que el lecho fluidizado puede transferir calor a una velocidad mucho más alta que en los hornos al vacío y de atmósfera controlada. Esta alta velocidad de transferencia de calor permite reducir drásticamente el tiempo del proceso [47] (ver Figura 2.11).



**Figura 2.11.** Comparación de tasas relativas de transferencia de calor en un lecho fluidizado y en otros medios. a) plomo, sales, horno convencional. Fuente [23]; b) hornos al vacío o de atmósfera controlada. Fuente [47].

Finalmente, cuando se hace un tratamiento térmico es necesario realizar una limpieza, sobre todo cuando se trabaja con sales, para evitar cualquier corrosión sobre la superficie de las piezas. Este problema no ocurre en los tratamientos térmicos al vacío o que utilizan gases inertes o un lecho fluidizado [39].

Por todo esto, el lecho fluidizado es una excelente alternativa para complementar los tratamientos térmicos, superior a los hornos al vacío o de atmósfera controlada. El uso de un lecho fluidizado garantiza la obtención de capas de igual

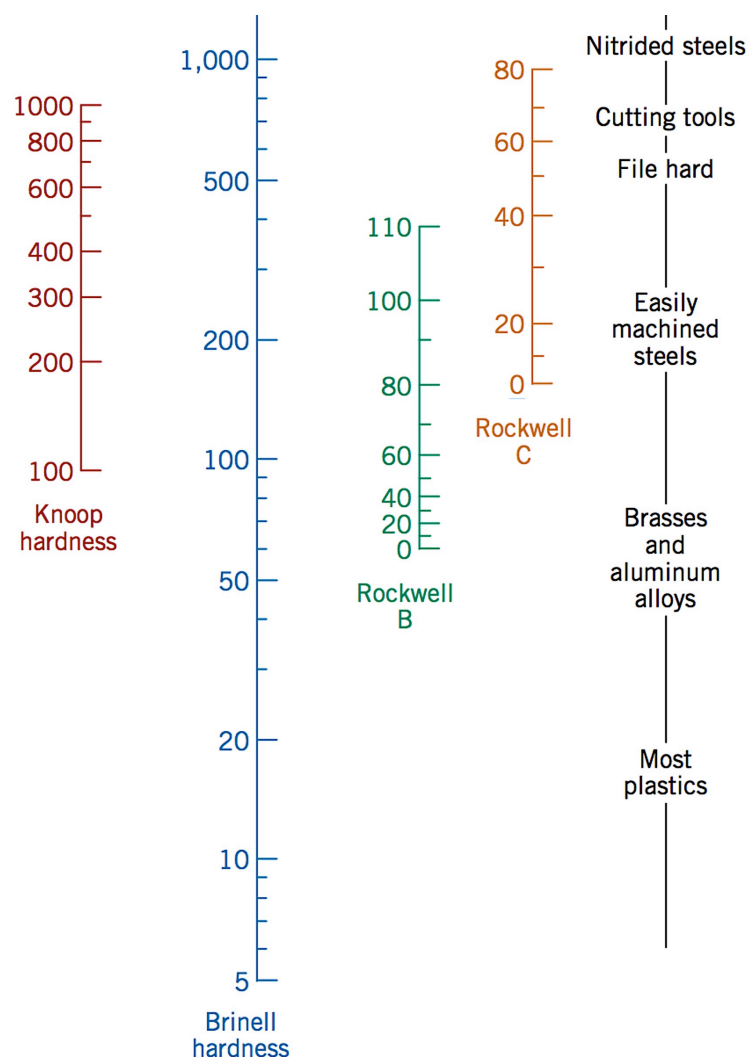
o superior calidad que el proceso original, en menos tiempo y con la ventaja adicional de no generar residuos.

## **2.5. Análisis de dureza**

Como se mencionó en un principio, el principal objetivo que tienen los tratamientos térmicos es el endurecimiento superficial de un material. En el caso del cementado, cuando se haya concluido el tratamiento (después del temple y revenido) la pieza que se cementó tendrá una dureza superior a la original.

La dureza se define como una propiedad mecánica que mide la resistencia de la capa superficial de un material a la deformación plástica localizada. Es decir, qué tan resistente es el material, a una alteración o deformación, cuando entra en contacto con otro cuerpo, más duro [34].

Para medir la dureza de un material, que de hecho es una propiedad de la capa superficial y no del material en sí, se utiliza un durómetro. Este aparato para medir dureza, utiliza un indentador para realizar un ensayo (no destructivo) de penetración en el material. El indentador es, precisamente, ese cuerpo de mayor dureza que se mencionó antes y que se pondrá en contacto con el material que se está analizando para determinar su dureza. Existen distintos tipos de durómetros que se diferencian por el rango de cargas y tipo de indentador que usan. Por otro lado, dependiendo del tipo de indentador, de un material y geometría específicas, y de la carga que se utilice para la medición, existen diferentes escalas para distintos rangos de dureza [48, 49].



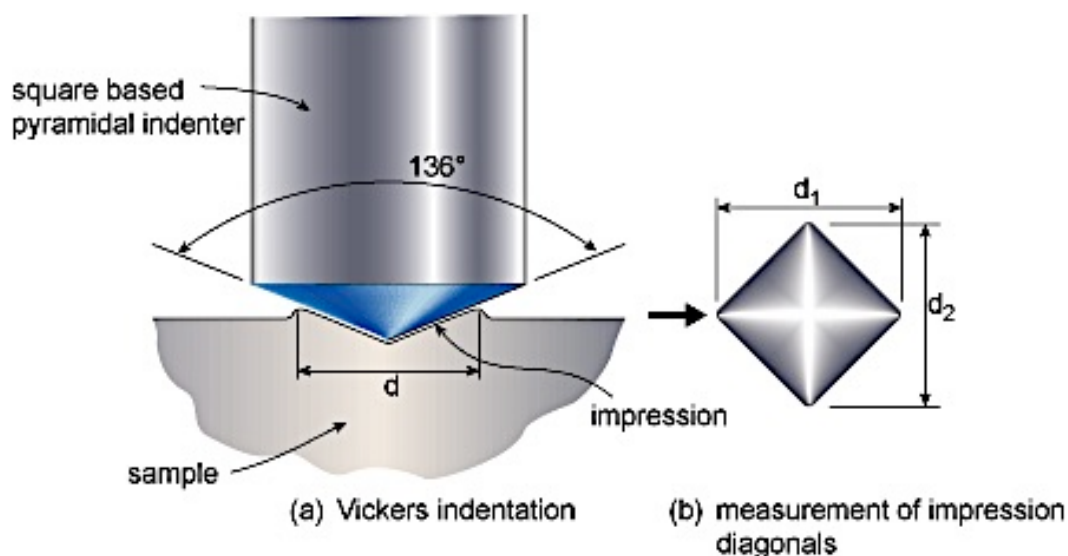
**Figura 2.12.** Comparación de las distintas escalas de dureza. Fuente [34].

El procedimiento que el durómetro utiliza para efectuar una medición empieza cuando se aplica una carga normalizada en el indentador sobre el material, de esta forma, se deja una huella de indentación en el mismo. Al analizar esta huella, considerando la profundidad y su tamaño, se calculará el valor de la dureza [50].

### 2.5.1. Ensayo de dureza Vickers

El durómetro para ensayos de dureza en escala Vickers es uno de los que más se usa junto con los de dureza en escalas Rockwell y Brinell. A diferencia de estos dos ensayos, que utilizan un indentador cónico de diamante y un esférico

(“de bola”) de acero, respectivamente, el ensayo de dureza Vickers utiliza un indentador piramidal de diamante. Por otro lado, las cargas que se manejan en este ensayo varían entre 1 y 1000 gramos para microdureza; y entre 1 y 120 kilogramos para dureza. Así, con una carga normalizada, aplicada y sostenida por un tiempo determinado, este indentador dejará una impresión, o huella, de la forma de un rombo (ver Figura 2.13) [51].



**Figura 2.13.** Ensayo de dureza Vickers. a) Indentación, b) Huella del indentador.  
Fuente [52].

El resultado del ensayo de dureza Vickers será una impresión del indentador en el material. Esta impresión rómbica servirá de referencia para calcular la dureza del material. Como se observa en la Figura 2.13, con la ayuda de un microscopio, se podrá medir las dos diagonales ( $d_1$  y  $d_2$ ) que se observa en la huella. Aunque ambas deberían tener longitudes similares [53].

De esta forma, considerando la longitud de las diagonales y la carga que se ha aplicado, la medida de dureza que se calcula viene dada por la Ecuación 2.9 [54]:

$$D_{HV} = 1.854 \times \frac{P}{d^2} \quad (2.9)$$

Donde:  $D_{HV}$  = Dureza obtenida en ensayo de dureza Vickers.

$P$  = Carga aplicada (masa  $\times$  gravedad).

$d$  = longitud de la diagonal medida.

Sin embargo, hoy en día no es necesario realizar este cálculo. Basta especificar el tamaño de una de sus diagonales y los durómetros digitales actuales entregarán directamente el valor de la dureza.

## 3. Metodología & Desarrollo Experimental

### 3.1. Equipos utilizados para el tratamiento de cementado

#### 3.1.1. Horno para tratamientos térmicos

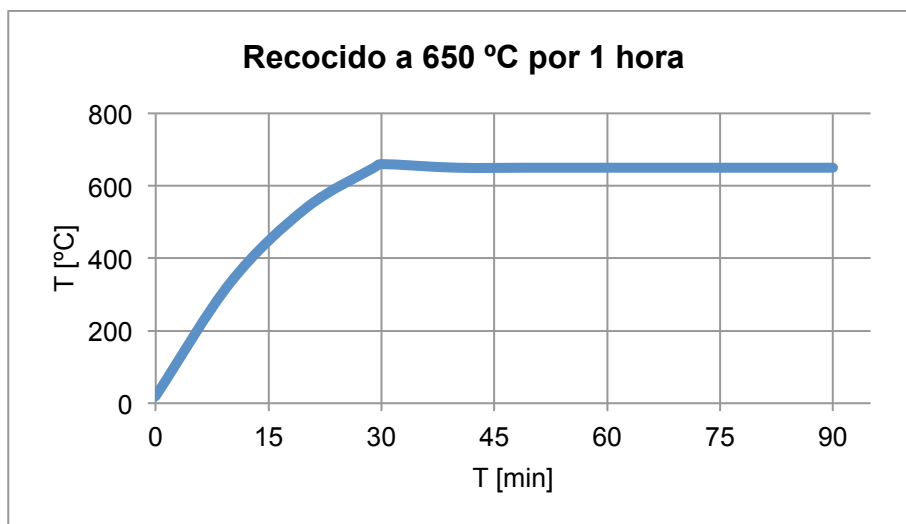
El horno de calentamiento de la marca Carbolite, modelo CWF 13/13, es el que se utilizó para el desarrollo del proceso de cementación. La cámara de este horno puede alcanzar una temperatura máxima de 1300 °C, además, mediante un controlador, es posible programar el proceso de calentamiento y así controlar varios parámetros como la velocidad de calentamiento, la temperatura que se quiere alcanzar y el tiempo que se quiere mantener una temperatura específica.



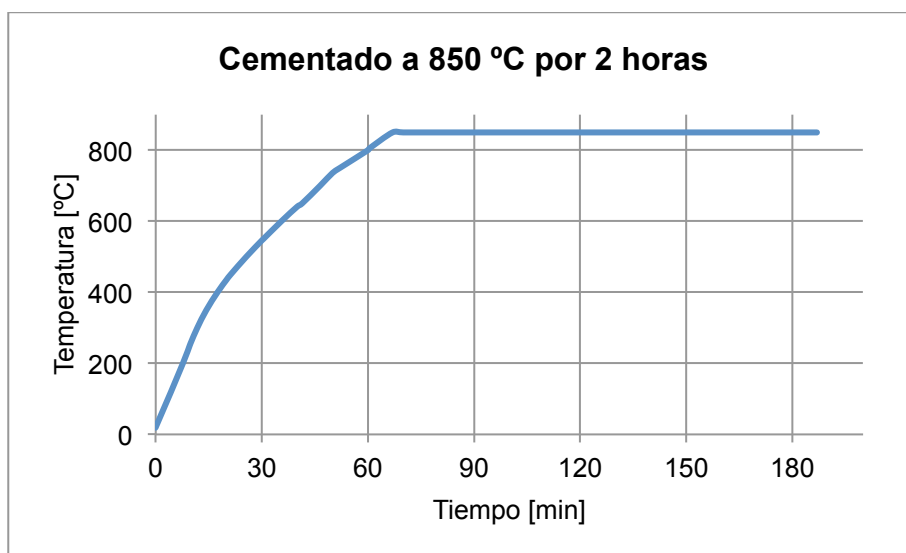
**Figura 3.1.** Horno para tratamientos térmicos Carbolite.

El comportamiento que va a tener el horno de acuerdo al programa que se ha creado, tanto para el tratamiento previo (recocido por tratamiento) como para el cementado, se puede observar gráficamente a continuación:





a)



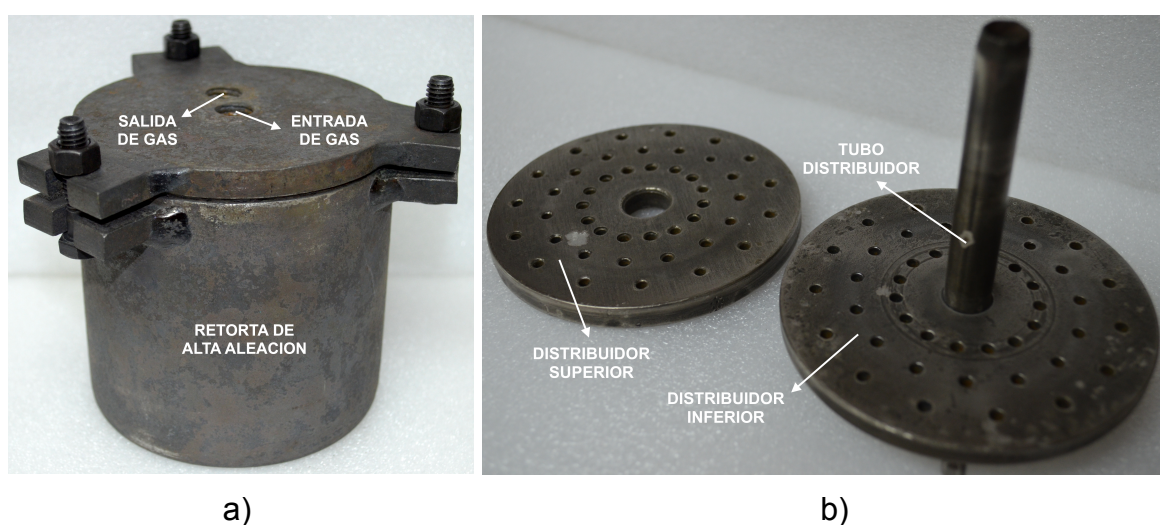
b)

**Figura 3.2.** Gráfico de temperatura vs tiempo del horno Carbolite para tratamientos térmicos a) Recocido por tratamiento (Process Annealing) a 650 °C, b) Cementado a 850 °C. Ambos procesos fueron enfriados en el horno.

### 3.1.2. Retorta para cementación por empaquetado con lecho fluidizado

El equipo que se va a utilizar para el cementado y que va a permitir crear una atmósfera adecuada para carburizar las piezas, es la retorta de alta aleación que

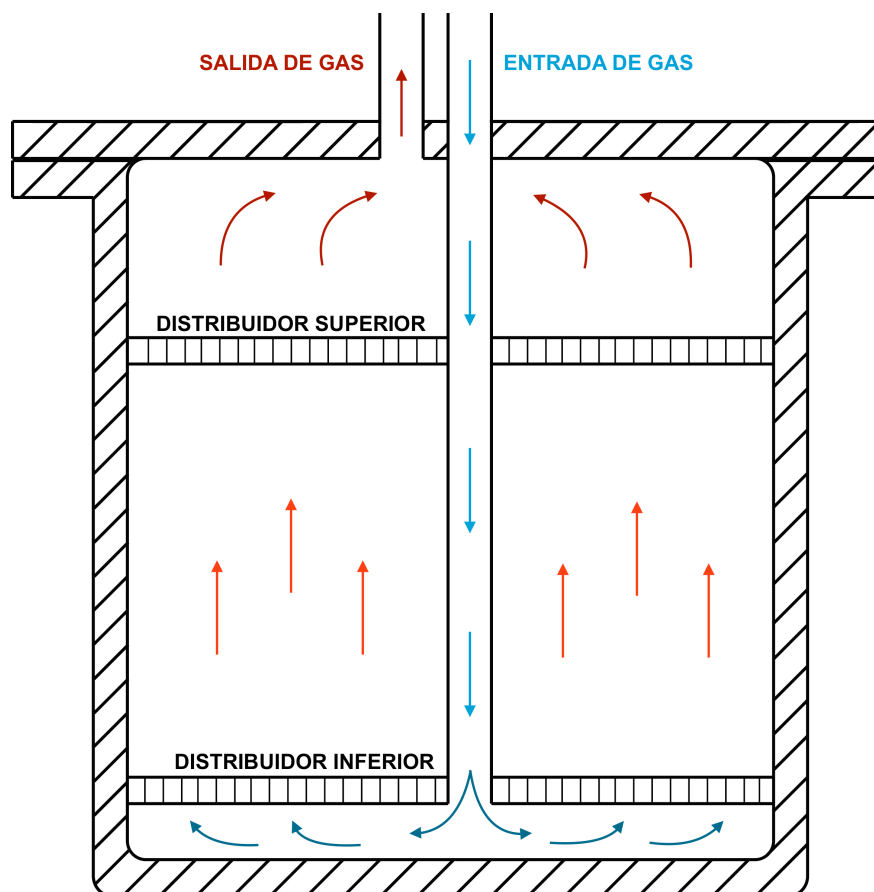
se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad San Francisco de Quito. Este equipo ya fue utilizado en un proyecto anterior de tratamientos termoquímicos. La retorta, además de funcionar como el recipiente hermético para el cementado por empaquetado, está diseñada para utilizar un lecho fluidizado dentro de la misma. Es por eso que contiene una entrada y una salida de gas, y tres distribuidores: el tubo, uno inferior y uno superior; tal como se muestra en la Figura 3.3.



**Figura 3.3.** Retorta diseñada para tratamientos termoquímicos por medio sólido, utilizando lecho fluidizado. a) Retorta de alta aleación. b) Elementos internos de la retorta: distribuidores.

La forma en la que este equipo va a funcionar (ver Figura 3.4.) para realizar el tratamiento de cementado es muy sencilla, tal como se había descrito en secciones anteriores, donde se habla sobre el proceso de cementado y el uso de un lecho fluidizado. La retorta que estará cerrada herméticamente será calentada dentro del horno y, al mismo tiempo, un gas ingresará para formar el lecho fluidizado. Además, este gas protector evitará el ingreso de oxígeno y de esta forma se tendrá una atmósfera óptima para el proceso. Finalmente, es importante

que exista un desfogue, de esta manera el gas puro que ingresa a la retorta estará circulando todo el tiempo en la misma, y el gas contaminado será evacuado.



**Figura 3.4.** Esquema de la entrada y salida de gases de la retorta en el lecho fluidizado.

### 3.2. Materiales

Los materiales que se van a utilizar para obtener la mezcla cementante son el carbón activado y el carbonato de sodio. Considerando una de las composiciones que se muestran en la Tabla 2.1., la mezcla cementante que se utilizará estará compuesta por un 90% de carbón activado y 10% de carbonato de calcio. Esta mezcla se ubicará entre los distribuidores inferior y superior de la retorta, y

envolverá a las piezas que se van a cementar. Por otro lado, el gas que se va a utilizar para trabajar con un lecho fluidizado será el Argón.

### 3.2.1. Carbón activado granular

El carburizante, o material portador de carbono, para el proceso de cementado es el carbón activado granular Super CAG-900 Mesh 8x20, adquirido en la casa de químicos nacional ERAFI S.A.



**Figura 3.5.** Carbón activado granular Super CAG-900 Mesh 8x20.

### 3.2.2. Carbonato de sodio

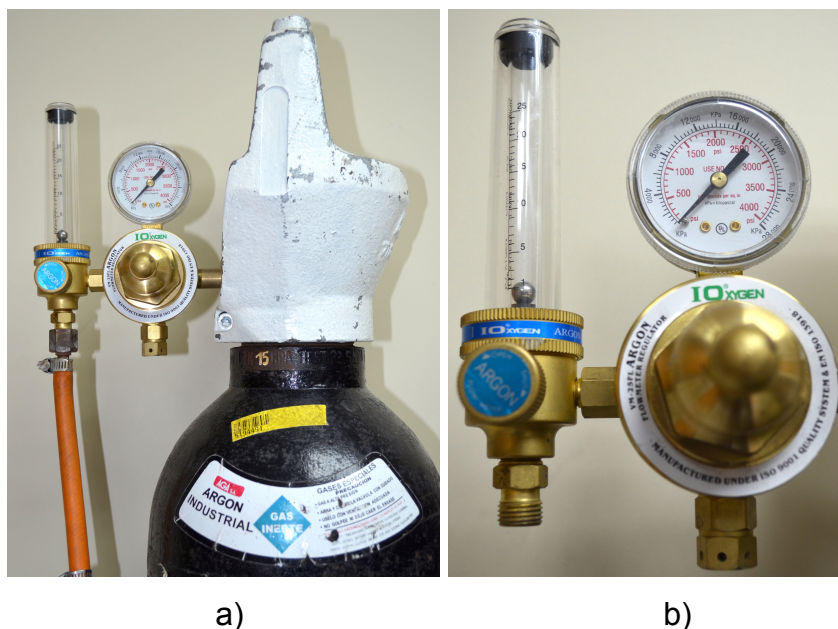
El material que funcionará como activador/energizante será el carbonato de calcio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). El mismo facilitará la adhesión de carbono en la superficie de la pieza y, en general, favorecerá el proceso. El carbonato de calcio liviano fue adquirido en la casa de químicos nacional LAQUIN Cía. Ltda., realizando el trámite necesario para compra ocasional de este reactivo en el CONSEP.



**Figura 3.6.** Carbonato de calcio. Fuente [55].

### 3.2.3. Gas argón y válvulas de control

Este gas inerte va a proteger la atmósfera durante el proceso y se empleará para el lecho fluidizado. El tanque de gas industrial argón que se utilizó fue adquirido en AGA S.A. El tanque está conectado a un manómetro de presión y a un regulador de flujo. En este proyecto se utilizó un flujo de gas de 1 litro/minuto.



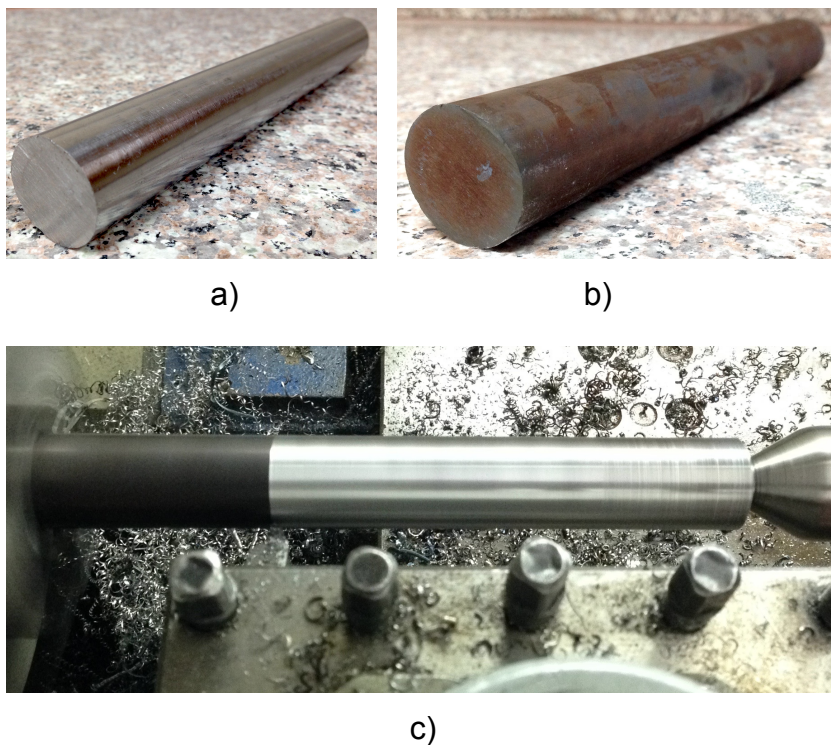
**Figura 3.7.** Fluido de gas para el lecho fluidizado. a) Tanque de argón industrial AGA conectado al manómetro de presión y al regulador de flujo. b) Manómetro de presión y regulador de flujo.



### 3.3. Ejecución del tratamiento de cementado

#### 3.3.1. Acero de bajo carbono

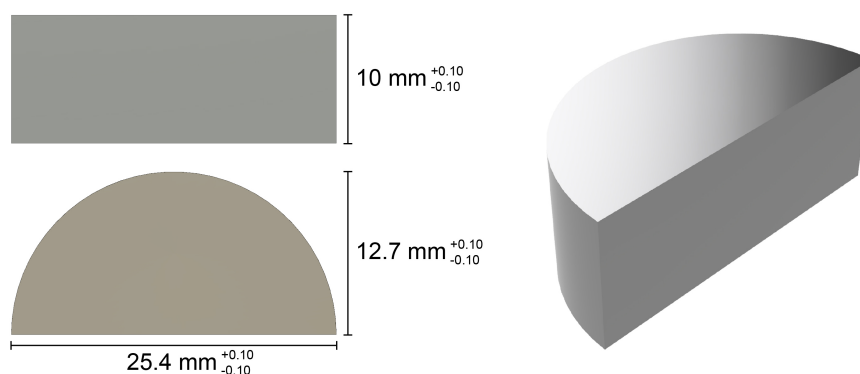
El acero que se utilizó para el tratamiento de cementado es el AISI 1018, conocido también como acero de transmisión. Este es un acero de bajo carbono ideal para tratamientos de endurecimiento superficial. El contenido de carbono de este acero está entre 0.14 - 0.20% aproximadamente, tal como especifica la norma AISI [56]. Antes de que el acero fuera cortado para obtener las probetas, la barra de acero de transmisión fue sometida a un proceso de recocido a 650 °C en el horno, por una hora y enfriado lentamente en el mismo, con el fin de eliminar esfuerzos residuales anteriores y como tratamiento previo al cementado. Finalmente, la barra fue maquinada ligeramente en un torno para remover la capa de óxido que se formó durante el recocido.



**Figura 3.8.** Acero de bajo carbono AISI 1018. a) Acero suministrado. b) Acero recocido. c) Acero maquinado en el torno.

### 3.3.2. Preparación de probetas

La barra de acero, de aproximadamente 25,4 mm. (1 in.) de diámetro, fue cortada en pequeños pedazos (rodajas) de 10 mm. Cada uno de estos pedazos fue cortado, nuevamente, en la mitad. Así, una de las probetas tendrá una forma final de un medio cilindro, tal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3.9.** Geometría de las probetas para cementación.

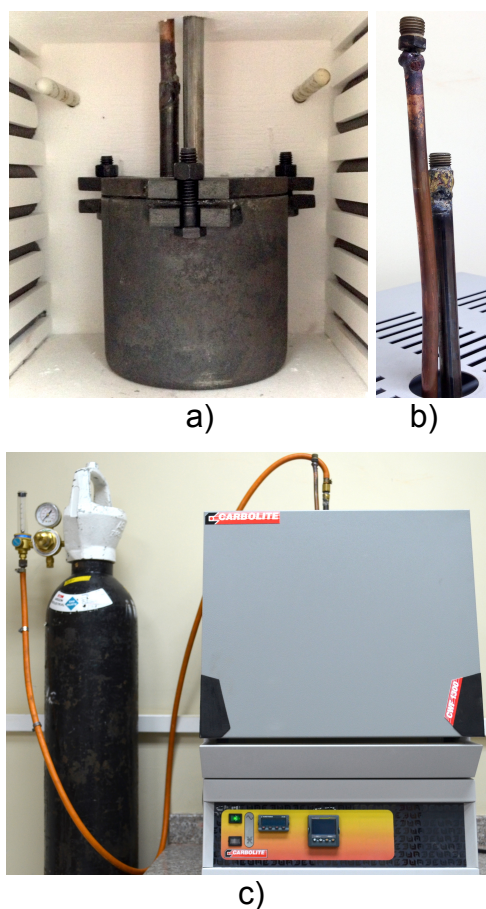
Cada probeta fue marcada con un número distinto para poder ser identificada fácilmente (ver Figura 3.10.). Además, todas las caras planas de las probetas fueron pulidas utilizando lijas número 60, 150, 320 y 400 (granos/pulgada), en ese orden. Finalmente, cada probeta fue limpiada con un desengrasante para eliminar cualquier residuo de grasa u óxido.



**Figura 3.10.** Probetas para cementación. a) Rodajas obtenidos al cortar la barra de acero. b) Probetas obtenidas al cortar las rodajas.

### 3.3.3. Procedimiento

El presente proyecto plantea el desarrollo del proceso de cementado por empaquetado utilizando un lecho fluidizado, para aceros de bajo carbono. Este procedimiento se lo lleva a cabo utilizando un horno especial para tratamientos térmicos, en el cual se calientan, dentro de un recipiente metálico sellado (retorta de cementación), la mezcla cementante y las piezas metálicas que se van a cementar. Además, se conectan dos tuberías a la retorta para la entrada y salida del gas que se utiliza para formar el lecho fluidizado. El regulador de flujo del argón se conectará a la entrada de gas. La salida de gas desemboca al aire libre de la habitación que cuenta con un sistema de extracción de gases.

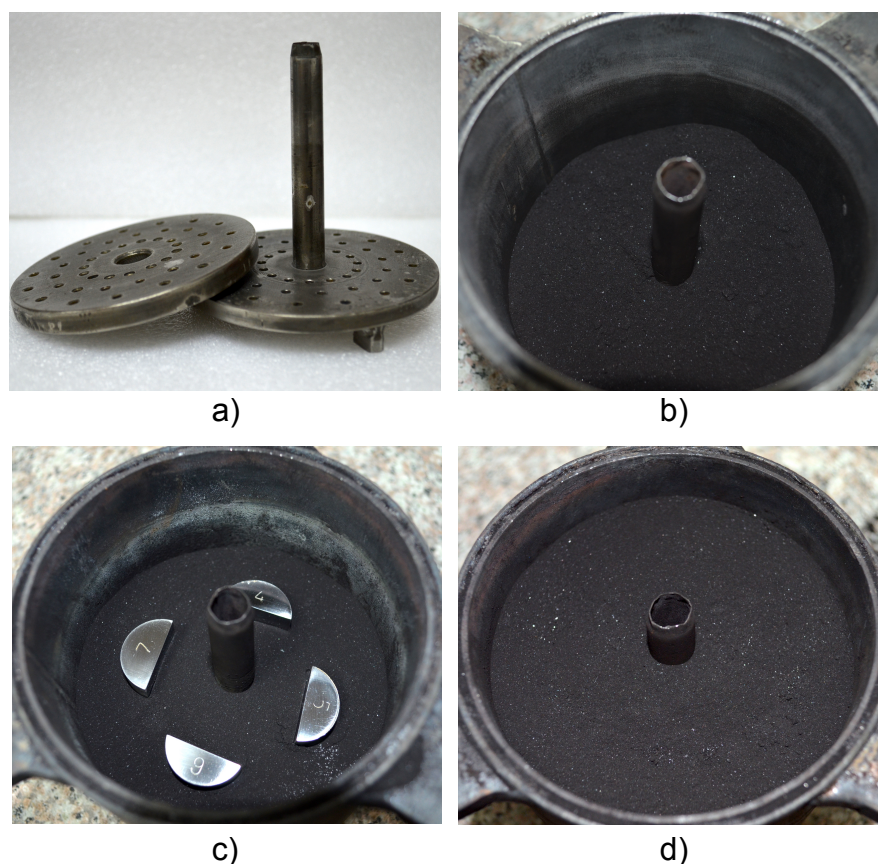


**Figura 3.11.** Instalación y conexión del equipo de cementado. a) Retorta en el horno. b) Conexiones de entrada/salida de gas. c) Equipo para el proceso: retorta dentro del horno conectada a las conexiones del gas argón.



Para la preparación de la mezcla cementante, considerando que los porcentajes de mezcla son 90% de carburizante y 10% de activador, se utilizaron 180 gramos de carbón activado y 20 de carbonato de calcio, para cada ensayo. La mezcla cementante fue colocada, entre los distribuidores superior e inferior. Las probetas que se van a cementar fueron ubicadas en el medio de toda la mezcla, separadas uniformemente. En cada experimento se utilizaron tres probetas.

Entonces, el orden en el que los distribuidores, mezcla y probetas, fueron colocados dentro de la retorta es el siguiente: primero, el distribuidor inferior; segundo, la mitad de la mezcla cementante; tercero, las probetas separadas a la misma distancia entre ellas; cuarto, la mitad restante de la mezcla; y por último, el distribuidor superior (ver Figura 3.12.).



**Figura 3.12.** Componentes, mezcla y probetas en la retorta. a) Distribuidores irán entre mezcla y probetas. b) La mitad de la mezcla está en la retorta. c) Colocación de probetas. d) El resto de la mezcla cementante.

Como se puede observar en la Figura 3.11., una vez que los distribuidores, la mezcla y las probetas estén dentro de la retorta, colocados adecuadamente, se tapa la retorta y se la asegura con tornillos y tuercas. Después, se coloca la retorta dentro del horno y se introducen, por la parte superior del horno, las conexiones de entrada y salida de gas para ajustarlas a la tapa de la retorta. En este momento, se programa el horno para llevar a cabo el proceso de cementado, es decir, se fija la tasa de calentamiento, la temperatura que se desea alcanzar y el tiempo que se quiere sostener dicha temperatura. Por último, cuando el proceso haya alcanzado la temperatura crítica ( $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en el horno, el regulador de flujo del argón debe ser abierto hasta la finalización del tratamiento. Además, se recomienda mantener el flujo del gas en el enfriamiento, para evitar oxidación, al menos hasta que la temperatura sea menor a la crítica. El enfriamiento fue en el mismo horno.

Por otro lado, también se realizaron experimentos en los cuales no se utilizó un lecho fluidizado. En estos casos, no se utilizó la entrada, ni salida de gas en la retorta, estas fueron selladas con dos tapones (ver Figura 3.13.). En todo lo demás, el procedimiento fue el mismo.



**Figura 3.13.** Retorta sellada para cementado sin lecho fluidizado.

### 3.3.4. Ensayos de cementado realizados

Se realizaron, en total, siete ensayos de cementación, con distintas condiciones de temperatura y tiempo. En tres de estos experimentos no se utilizó el lecho fluidizado. La variabilidad de pruebas permitirá determinar el escenario apropiado para que el cementado sea lo más eficiente posible. Además, se reservó una probeta de testigo para un futuro análisis entre el material original y el cementado. Para cada una de las pruebas que se realizaron, se utilizó la misma tasa de calentamiento en el horno, 30 °C/minuto (ver Figura 3.2-b), y la misma mezcla cementante. Las probetas que se utilizaron en cada uno de los ensayos realizados, bajo condiciones específicas, se muestran a continuación:

**Tabla 3.1.** Ensayos de cementado realizados con lecho fluidizado.

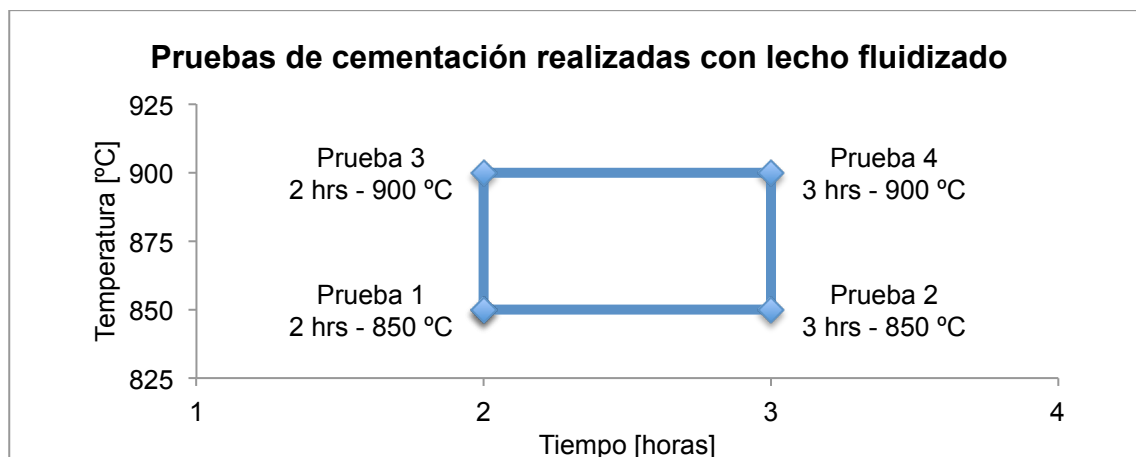
Prueba No.	Probetas	Tiempo [hrs]	Temperatura [°C]
1	1, 2, 3	2	850
2	17, 18, 19	3	850
3	20, 21, 22	2	900
4	23, 24, 25	3	900

**Tabla 3.2.** Ensayos de cementado realizados sin lecho fluidizado.

Prueba No.	Probetas	Tiempo [hrs]	Temperatura [°C]
5	4, 5, 6, 7	2	900
6	8, 9, 10	2	900
7	11, 12, 13	3	900
8	14, 15, 16	3	950

En este proyecto únicamente se analizará las probetas que fueron cementadas con lecho fluidizado, ya que solamente estas son de interés particular. Además, en las probetas cementadas sin lecho fluidizado, no se consiguieron resultados

donde se pueda evidenciar una capa de cementación en la superficie.



**Figura 3.14.** Pruebas de cementación utilizando un lecho fluidizado, descritas en la Tabla 3.1.

Una vez que se realizaron todas las pruebas de cementación, las probetas fueron clasificadas y ordenadas para realizar análisis metalográficos y de dureza.



**Figura 3.15.** Probetas cementadas con lecho fluidizado al sacarlas de la retorta, correspondientes al primer ensayo.

### 3.4. Análisis del tratamiento de cementado

#### 3.4.1. Análisis de dureza

Las medidas de dureza fueron obtenidas utilizando un durómetro para ensayos de dureza Vickers. No se utilizó un ensayo de dureza Rockwell debido a que las

muestras no estaban endurecidas, ya que no han sido templadas ni revenidas, y por tanto su dureza está por debajo del rango de un ensayo Rockwell-C, que es el que normalmente se practica con un acero cementado y endurecido.

Para el ensayo de dureza Vickers se utilizó el durómetro Wolpert 432 SVD de Wilson Instruments, que utiliza un indentador piramidal de diamante (Figura 3.16).

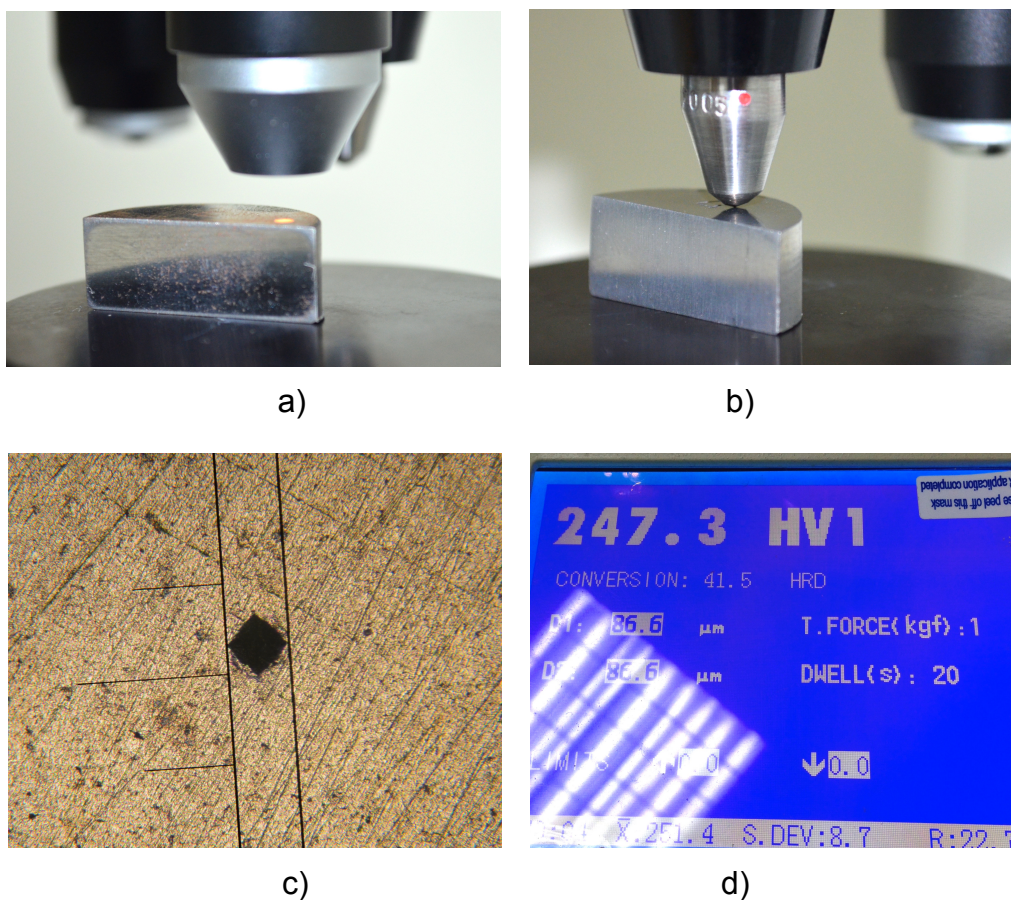


**Figura 3.16.** Equipo para análisis de dureza. a) Durómetro Wolpert para ensayos de dureza Vickers. b) Indentador piramidal de diamante utilizado en este ensayo.

El procedimiento para realizar un ensayo de dureza es sencillo. Primero se escoge la carga que se quiere aplicar. Segundo, en el microscopio, las líneas que ayudan a medir las diagonales, se deben colocar lo más juntas posibles para poder encerrar el durómetro presionando la tecla “ZERO”. Tercero, se coloca la muestra en la mesa del durómetro y, con ayuda del microscopio, se ajusta el enfoque hasta observar claramente la zona que se quiere medir. Cuarto, se presiona “START” para que el durómetro empiece el ensayo y el indentador



penetre la superficie de la muestra. Por último, una vez que el indentador haya dejado la huella rómbica como la que se observa en la Figura 2.13; utilizando el lente ocular, se debe ajustar con el codificador digital las líneas en la huella y presionar dos veces el botón del lente ocular para medir una de las diagonales, y el durómetro entregará una medida de la dureza exacta.



**Figura 3.17.** Ensayo de dureza Vickers. a) Ajuste de enfoque con el microscopio. b) Indentador penetra la superficie de la muestra. c) Ajuste de líneas en los vértices de la huella. d) Valor de dureza en la pantalla digital.

Se realizaron mediciones de dureza a todas las probetas que fueron cementadas y también a la probeta “testigo”. Se tomaron varias medidas y se fueron descartando las que estaban muy alejadas de la media. Así, se consideraron únicamente seis medidas que no muestran una gran variabilidad entre ellas.

### **3.4.2. Análisis metalográfico**

El análisis metalográfico fue el segundo estudio que se realizó tras el proceso de cementado. Este análisis será el más importante para este proyecto, ya que con el mismo se podrá determinar si el proceso de cementación fue llevado a cabo exitosamente o no.

Con un análisis metalográfico se puede estudiar las microestructuras del material para poder determinar algunas características importantes para distintos análisis. Por ejemplo, gracias a una metalografía se puede determinar en una microestructura el tamaño y forma de sus granos, el tipo de fase y ciertas inclusiones que alterarán las propiedades mecánicas del acero [57]. Precisamente, una de estas alteraciones que influirán en las propiedades mecánicas será la capa de cementación que se quiere conseguir en la superficie del acero.

Para realizar el análisis metalográfico es importante preparar la muestra adecuadamente. Para esto, primero hay que asegurarse de qué información es la que se quiere obtener de la muestra y en qué superficie de la misma se podrá hallar. En este caso, se quiere estudiar el espesor de una capa de carbono que se consiguió con un tratamiento de endurecimiento superficial. La misma se va a poder encontrar en cualquier superficie lisa de las muestras. Una vez que se ha definido un criterio de análisis para la metalografía, se procede a preparar la muestra realizando un montaje, un desbaste (pulido) y un ataque químico. Esto va a permitir, finalmente, observar la muestra (preparada metalográficamente) en el microscopio para analizar todas las características microestructurales que sean de interés.

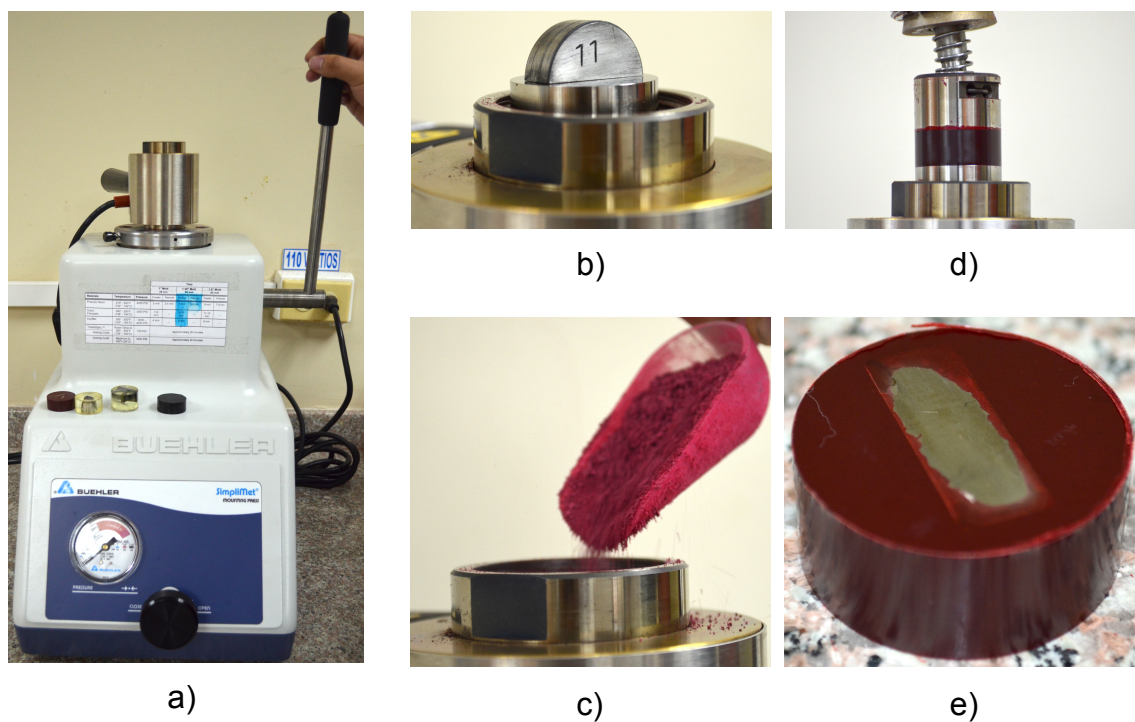
### **3.4.2.1. Montaje**

El montaje consiste en el encapsulamiento de la probeta para facilitar la manipulación de la misma más adelante, cuando se lleve a cabo el desbaste. En este caso, es conveniente montar las probetas ya que estas son relativamente pequeñas y su manejo será un tanto incómodo cuando se realice el pulido. En el laboratorio que se realizó el proyecto, se puede utilizar dos tipos de montajes, el encapsulamiento en frío con resina utilizando un molde (ver Figura 3.18) y el encapsulamiento en caliente con baquelita utilizando una prensa de montaje (ver Figura 3.19). En el primer caso, se colocan la probeta y la mezcla para recubrir la dentro del molde, la mezcla estará compuesta por resina y un endurecedor, ambos epóxicos. Para el otro caso, se colocan la probeta y el material para recubrir, que en este caso será la baquelita, en la prensa, la cual con ayuda de calor y presión hará el montaje para la muestra. En ambos casos la probeta debe ser colocada, tanto en el molde como en la prensa, de manera que la superficie que se vaya a analizar quede boca abajo. La diferencia entre ambos métodos, o tipos de montaje, se resume al tiempo que se emplea en cada uno de ellos. El montaje por resina, que implica preparar la mezcla con las cantidades exactas que sugiere el fabricante (Buehler) y engrasar el molde para evitar atascamientos al extraer la muestra montada, toma 24 horas, ya que se debe esperar que la mezcla actúe y se endurezca para que la probeta sea encapsulada. Mientras que en el montaje por baquelita basta controlar la presión (hidráulicamente) y la temperatura, de acuerdo a lo que indica el manual del fabricante, para obtener la muestra montada en menos de 10 minutos.





**Figura 3.18.** Montaje en frío con resina. a) Endurecedor y resina epóxicas Buckler. b) Montaje utilizando un molde Buckler.



**Figura 3.19.** Encapsulamiento en prensa con baquelita. a) Prensa de montaje SimpliMet® 2. b) Colocación de probeta en prensa. c) Colocación de baquelita en prensa. d) Fin del montaje. e) Probeta montada por baquelita.

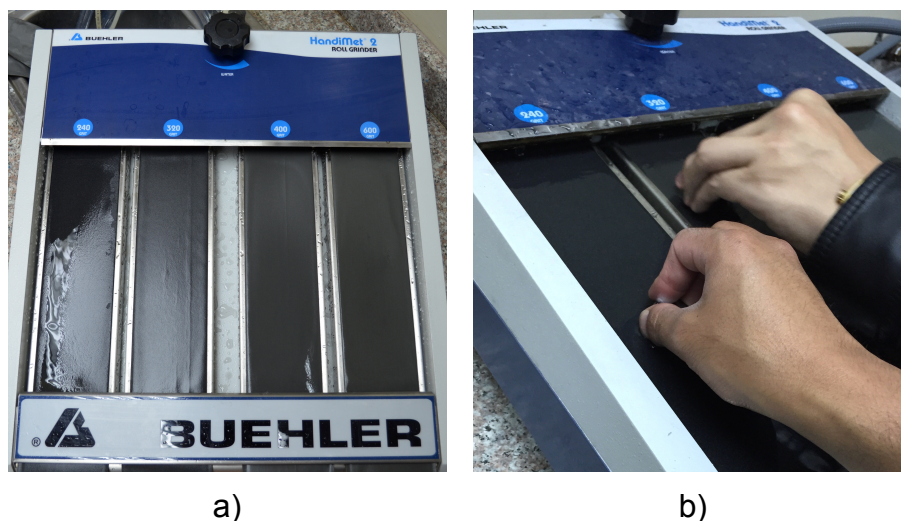
En este proyecto se realizaron ambos métodos de montaje, la elección de utilizar un montaje de resina por molde dependerá si se desea obtener un encapsulamiento estético o darle una forma en particular al mismo, o si se quiere

sacarle ventaja al hecho de que el recubrimiento del montaje sea transparente. Si no es el caso, el montaje a través de una prensa es mucho más eficiente y rápido, sobre todo cuando se trata de encapsular muchas muestras y no es de interés un montaje con las características del que se obtiene con resina en un molde. Cualquiera sea el tipo de montaje que se haya utilizado, una vez que se lo haga se podrá continuar con los siguientes pasos: el desbaste y el ataque químico a la muestra.

#### **3.4.2.2. Desbaste grueso**

Para poder observar claramente las características microestructurales, se debe pulir la muestra para eliminar residuos de óxido, rayaduras y cualquier desigualdad en la cara de la superficie que se vaya a analizar. Desde luego que todos estos defectos no son demasiado evidentes a simple vista, pero cuando se observa con un microscopio serán muy visibles y obstruirán cualquier estudio.

El desbaste grueso suele ser manual, utilizando papeles de lija de diferentes tamaños de grano. Utilizando un banco de pulido con distintos rollos de lija y agua (para evitar que la muestra se caliente demasiado), el procedimiento para este desbaste es pulir la superficie de la muestra en cada banda del banco de pulido, empezando por la lija de tamaño de grano 240, pasando por las lijas 320 y 400, y finalmente por la de grano 600. En cada banda, el pulido deber ser realizado en una sola dirección, es decir, se debe presionar la muestra uniformemente y pulirla hacia abajo varias veces, hasta que no se aprecie ninguna raya horizontal. Cuando esto suceda, se gira la muestra 90° y se repite el proceso, así hasta que se vuelva a la posición en la que se empezó el pulido. Por tanto, la muestra será pulida en una sola dirección y en cuatro posiciones distintas.



**Figura 3.20.** Desbaste grueso. a) Banco de pulido manual HandiMet® 2 con rollos de lija. b) Pulido unidireccional de muestras.

El número de veces que se debe pulir unidireccionalmente varía según la muestra, la presión que se ejerza, la posición en la que esté la muestra, la longitud de la trayectoria en el pulido o la lija de grano que se esté utilizando; sin embargo, como referencia, en este proyecto se repetía unas 50 veces el desbaste unidireccional, en cada uno de las posiciones de la muestra, y en cada banda del banco de pulido.



**Figura 3.21.** Superficie de las muestras tras pasar por el desbaste grueso.

### **3.4.2.3. Desbaste fino**

Con el desbaste anterior habrán desaparecido rayones e irregularidades de la superficie que eran muy notorias a simple vista. Sin embargo, como se mencionó en un inicio, al observar en un microscopio se seguirá encontrando imperfecciones en la superficie de las muestras. Por esta razón, se debe realizar un desbaste fino, que consiste en pulir las muestras sobre paños especiales y con la ayuda de abrasivos, como una suspensión de diamante.

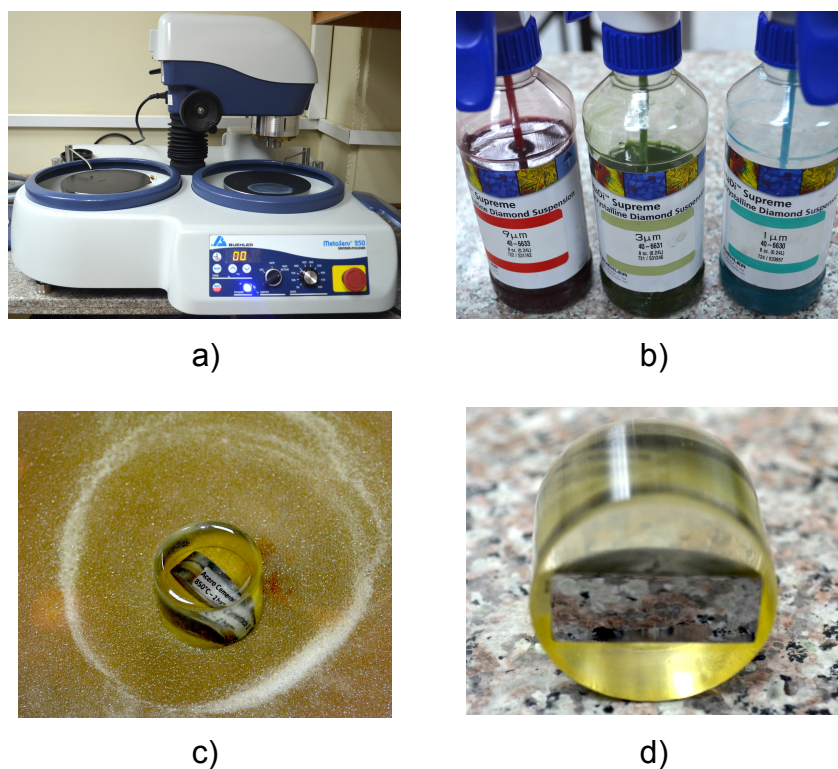
Por otro lado, hay que mencionar que el montaje de las probetas fue de gran ayuda al momento de realizar el desbaste fino. A diferencia de lo que ocurre en el desbaste previo, donde se pueden sostener las muestras y realizar el pulido sin mayor dificultad, el pulido fino se vuelve una tarea fastidiosa si las muestras no están montadas. Esto se debe a que el movimiento que se realiza en el desbaste fino es circular y rápido, si se hace manualmente. Y si se utiliza una máquina pulidora, también se puede tener inconvenientes al sostener la muestra sobre el disco de pulido que rota a altas velocidades.

De cualquier manera, manual o utilizando una máquina pulidora, el procedimiento para el desbaste fino es el mismo. Primero, se humedece el paño de pulido y se agrega una cantidad pequeña de la suspensión de diamante. Se utilizaron tres paños abrasivos: de 9, 3, y 1 micras; y tres distintas suspensiones, con distinto grado de partículas, para cada paño. Y segundo, se realiza movimientos circulares sobre el paño de pulido por un lapso de 5 minutos, aproximadamente. Si es que se utiliza la máquina, se fija una velocidad angular del disco entre 400 y 600 rev/min y se sostiene la muestra sobre el paño adherido al disco por unos 2 minutos. Este proceso se debe realizar en cada paño abrasivo con su respectiva



suspensión de diamante, empezando por la de 9 micras y terminando con la de 1 micra para el acabado final. Además, se debe limpiar con agua antes de cambiar al siguiente paño de pulido.

Es importante, en ambos desbastes, no topar con los dedos la superficie pulida y evitar que esta quede húmeda cuando se vaya a dejarla al aire libre, ya que se puede oxidar. Por tanto, es recomendable realizar el ataque químico para continuar con el análisis, inmediatamente después del pulido fino. Una vez terminado este proceso se habrá eliminado cualquier rastro de rayones, residuos de óxido o cualquier imperfección, y se tendrá una superficie con un “efecto espejo”, es decir, que en la misma se podrá reflejar cualquier objeto.



**Figura 3.22.** Desbaste fino y superficie de muestra tras pasar por el mismo. a) Máquina pulidora semiautomática MetaServ® 250. b) Suspensiones de diamante policristalino MetaDi® Supreme de Buehler. c) Muestra montada sobre el paño de pulido humedecido agua y la suspensión de diamante. d) Acabado de muestra en el pulido fino (efecto espejo).

#### **3.4.2.4. Ataque químico**

El último paso antes de llevar la muestra metalográfica al microscopio para analizarla, es el ataque químico, que es un proceso de corrosión controlada. A pesar de que, tras el pulido, la superficie de la muestra sea plana y no presente ningún defecto, sin el ataque químico no se podrá observar mayor cosa en el microscopio. Por esta razón, la superficie de la muestra debe ser atacada para poder evidenciar las fases y características estructurales del metal.

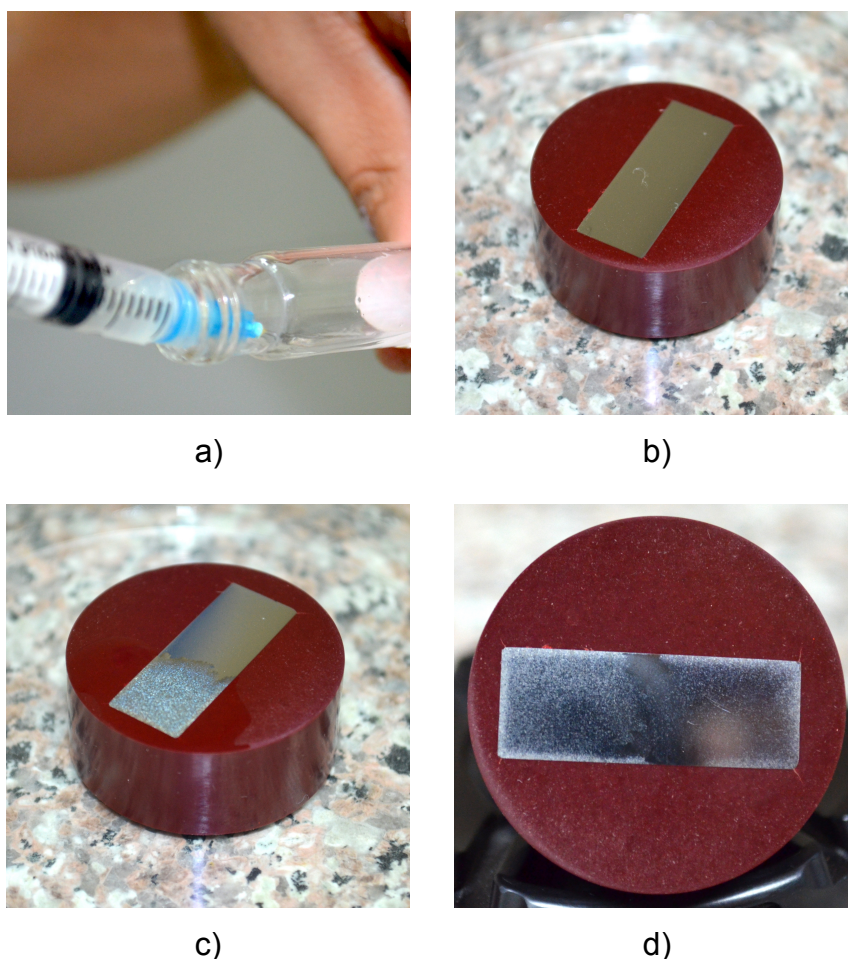
El ataque químico, también conocido como grabado, consiste en tratar la superficie de la muestra con una solución compuesta con los reactivos químicos adecuados. El ataque se puede realizar sumergiendo (por inmersión) la superficie en el reactivo o frotando el reactivo con un algodón en la misma. Existen diferentes soluciones químicas y procedimientos que se utilizan en el grabado (etching) de metales. Todo va a depender del material de la muestra y lo que se quiera encontrar en el análisis metalográfico.

En este caso, se quiere atacar químicamente un metal a base de hierro y carbono para poder observar la estructura general del metal y determinar el espesor de la capa cementada que se consiguió con el tratamiento de endurecimiento. Basándose en la Designación de la ASTM E407-07 de la práctica estándar para micrograbado de metales y aleaciones, el reactivo de ataque que se debe usar es el 74a, el mismo debe contener de 1 a 5 mL  $\text{HNO}_3$  (ácido nítrico) y 100 mL de etanol o metanol al 95%; y que el tiempo de ataque, por inmersión, debe ser por un lapso de tiempo que puede variar entre unos pocos segundos hasta un minuto [58].

Para preparar la mezcla se utilizó un pequeño tubo de vidrio, donde es muy

importante colocar el ácido nítrico antes que el etanol, para evitar una posible reacción. Después, el ataque se realizó con la ayuda de una jeringa para poder aplicar el reactivo solamente sobre una zona, y no en toda la muestra. El ataque empieza en el momento que se aplica el reactivo y termina cuando se enjuaga la muestra con agua.

Es importante aplicar el reactivo solamente en una zona, ya que muchas veces el tiempo que se ataca a la muestra no es el apropiado y se debe realizar un nuevo ataque por un tiempo distinto. Por esta razón, si se aplica el reactivo por zonas, se puede realizar varios ataques sin tener que volver al desbaste fino.



**Figura 3.23.** Ataque químico. a) Reactivo para el ataque. b) Muestra pulida, limpia y preparada. c) Ataque a una zona de la muestra. d) Ataque a distintas zonas de la muestra.

#### 3.4.2.5. Microscopio utilizado para análisis metalográfico

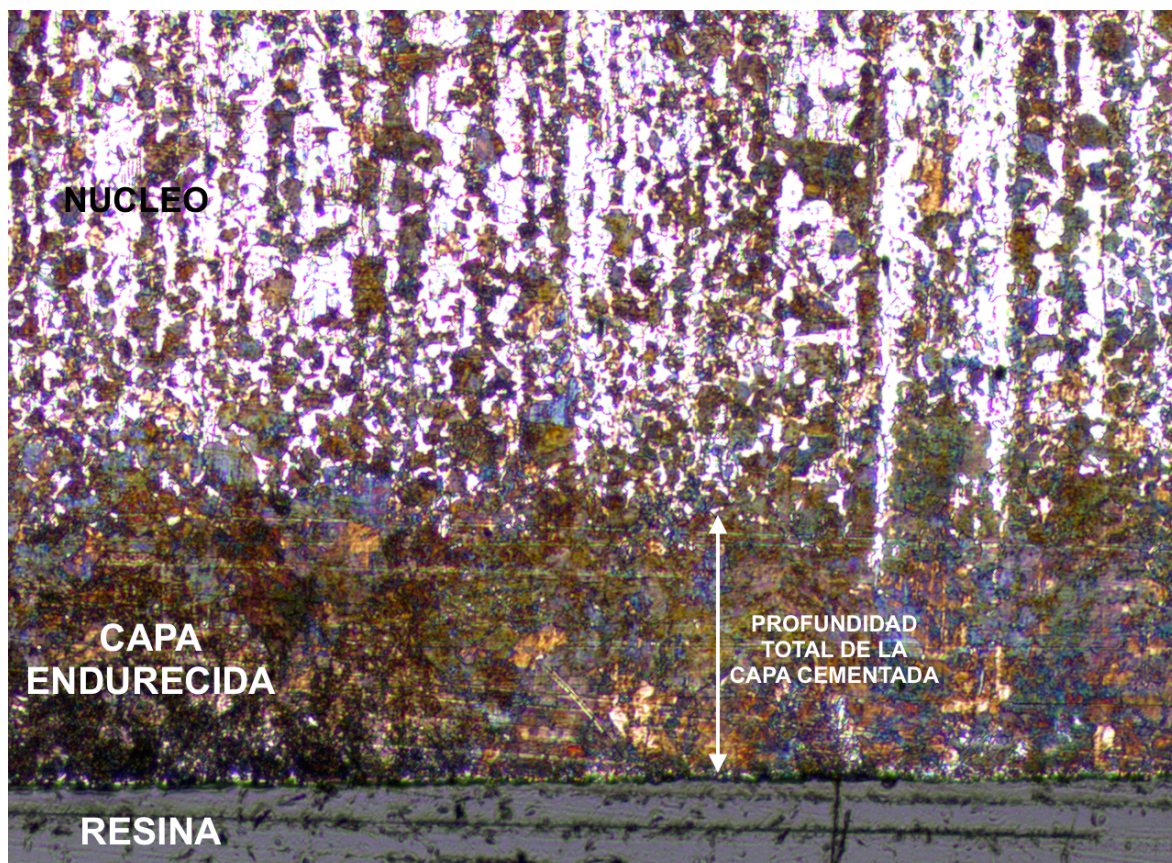
Una vez que se atacó correctamente la muestra, se va a poder realizar el análisis metalográfico en el microscopio. El estudio se realizó en el microscopio Eclipse MA100 que se encuentra también en el Laboratorio de Ingeniería de Materiales.



**Figura 3.24.** Microscopio ECLIPSE MA100 para el análisis metalográfico.

Escogiendo el aumento adecuado, lo que se va a observar en el microscopio será la microestructura del metal. Utilizando la cámara incorporada *uEye* del microscopio y el software computacional *uEye Cockpit*, de *IDS Software Suite*, se podrá conseguir una micrografía de la muestra, es decir, una fotografía de lo que se está observando en el microscopio electrónico. En este caso, por el tiempo y la solución que se utilizó en el ataque, se podrá observar claramente el contraste que existe entre la zona que fue endurecida por cementación y el núcleo, tal como se observa en la Figura 3.25.





**Figura 3.25.** Análisis de una micrografía observada en uEye Cockpit. La micrografía (50X) pertenece a la superficie de una muestra de acero AISI 1018 que fue cementado por empaquetado y lecho fluidizado por 2 horas y a 850 °C. La muestra fue atacada con el reactivo 74a (designación E407-07 ASTM) por 50 segundos.

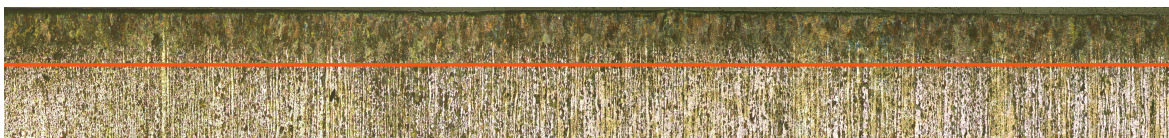
Ahora, una vez que se tiene la micrografía, con la ayuda del software de procesamiento de imagen *ImageJ*, de *NIH Image*, se va a poder determinar el espesor de la capa cementada.

#### **3.4.2.6. Profundidad de la capa cementada**

Cuando se analiza la profundidad de la capa cementada existen dos tipos de estudios: la profundidad total de la capa cementada y la profundidad efectiva de la capa cementada. Este último respalda su análisis con un barrido de mediciones

de dureza. La profundidad efectiva de la capa es la distancia perpendicular desde el límite de la superficie hasta un punto dentro de la zona endurecida, en este sitio la dureza alcanzará un valor mínimo ya establecido anteriormente. Por otro lado, la profundidad total de la capa es la distancia perpendicular desde el límite de la superficie hasta el final de la zona endurecida, es decir, hasta el lugar donde ya no sea posible distinguir claramente una diferencia entre las propiedades físicas o químicas del núcleo y la capa cementada [23, 59, 60].

La Figura 3.26 muestra una combinación de varias micrografías tomadas a lo largo de una muestra cementada. En la misma se puede observar el contraste entre la zona endurecida y el núcleo, limitadas por una línea. La distancia perpendicular desde el límite de la superficie hasta el límite de la línea roja será una buena aproximación para calcular la profundidad total de la capa cementada.



**Figura 3.26.** Zona cementada observada en análisis metalográfico. La combinación de varias micrografías (50X) pertenecen a la superficie de un acero AISI 1018 cementado por empaquetado (utilizando lecho fluidizado) por 2 horas y a 850 °C; atacada con el reactivo 74a (designación E407-07 ASTM) por 45 segundos.

En este proyecto, únicamente se analizará la profundidad total de la capa cementada. Basta con este análisis para poder determinar si el proceso de cementado se ha realizado exitosamente.

## 4. Resultados Experimentales y Discusiones

### 4.1. Resultados y discusión de las mediciones de dureza

#### 4.1.1. Mediciones de dureza

Para las mediciones de dureza obtenidas en el durómetro, primero se obtuvieron valores en escala Vickers (HV), con una carga de 1 kgf, para luego transformar su valor promedio a escala Rockwell C (HRC) utilizando la Ecuación 4.1 [61]. También se pueden transformar estos valores para distintas escalas utilizando las tablas estandarizadas de conversión de dureza de la Designación E140-02 de la ASTM [62].

$$HRC = \frac{100 \times HV - 14500}{HV + 223} \quad (4.1)$$

Anteriormente (ver Tabla 3.1) se describió las pruebas de cementación con lecho fluidizado que se realizaron. A continuación se muestran los valores de dureza obtenidos en el material original (sin cementar) y en cada una de las pruebas de cementación (sin temple ni revenido).

**Tabla 4.1.** Dureza del acero AISI 1018 sin cementar.

AISI 1018 (Acero sin cementar)	
Medición	Probeta 0
1	120.1
2	142.8
3	128.4
4	116.7
5	110.8
6	128.4
$\sigma$	10.27
Promedio	124.53
<b>Dureza HV</b>	<b>124.53</b>

**Tabla 4.2.** Dureza del acero AISI 1018 cementado a 850 °C - 2 horas.

<b>AISI 1018 cementado a 850 °C por 2 hrs</b>			
Medición	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
1	N/D	271.1	226.9
2	N/D	259.7	240.0
3	N/D	240.3	242.2
4	N/D	260.3	254.3
5	N/D	243.3	240.0
6	N/D	267.3	241.1
$\sigma$	N/D	11.47	7.95
Promedio	N/D	257.00	240.75
<b>Dureza HV</b>	<b>248.88</b>		

**Tabla 4.3.** Dureza del acero AISI 1018 cementado a 850 °C - 3 horas.

<b>AISI 1018 cementado a 850 °C por 3 hrs</b>			
Medición	Probeta 17	Probeta 18	Probeta 19
1	271.1	274.5	271.8
2	271.8	275.1	275.8
3	273.8	272.5	275.1
4	264.1	274.1	273.8
5	264.7	266	272.5
6	270.5	276.5	275.8
$\sigma$	3.64	3.40	1.57
Promedio	269.33	273.12	274.13
<b>Dureza HV</b>	<b>272.19</b>		

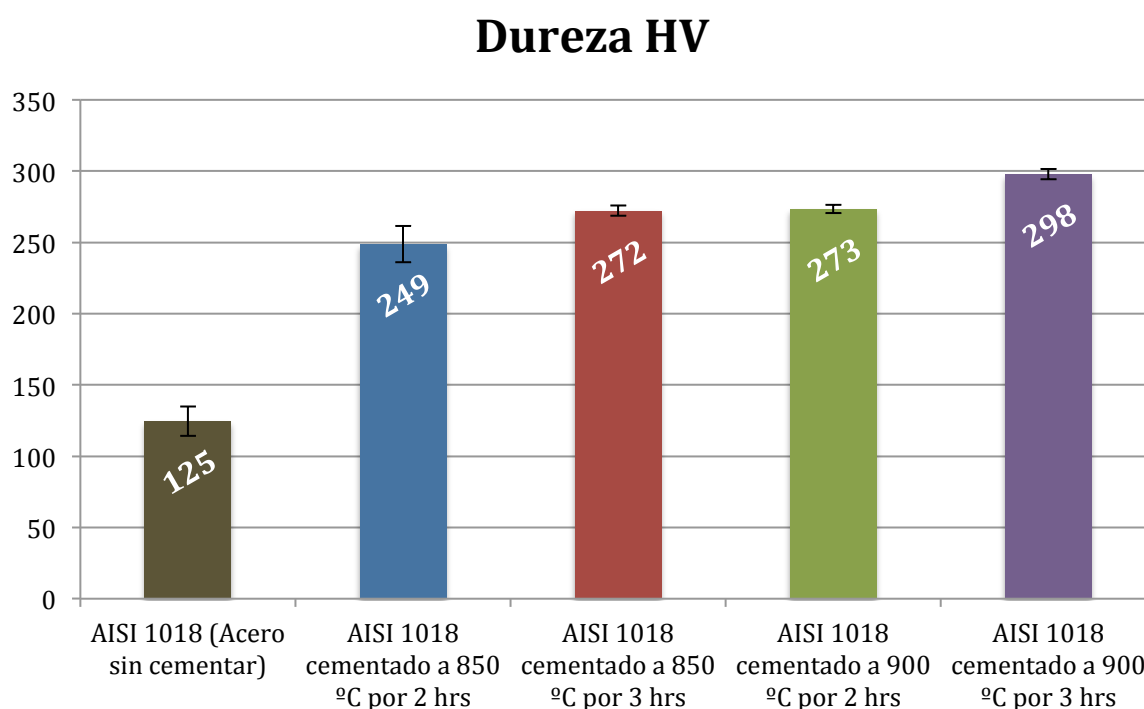
**Tabla 4.4.** Dureza del acero AISI 1018 cementado a 900 °C - 2 horas.

<b>AISI 1018 cementado a 900 °C por 2 hrs</b>			
Medición	Probeta 20	Probeta 21	Probeta 22
1	269.2	273.1	281.9
2	271.1	276.5	273.1
3	273.1	273.1	273.8
4	271.8	273.8	271.1
5	270.5	274.5	277.8
6	272.5	273.1	271.8
$\sigma$	1.29	1.22	3.78
Promedio	271.37	274.02	274.92
<b>Dureza HV</b>	<b>273.43</b>		

**Tabla 4.5.** Dureza del acero AISI 1018 cementado a 900 °C - 3 horas.

<b>AISI 1018 cementado a 900 °C por 3 hrs</b>			
Medición	Probeta 23	Probeta 24	Probeta 25
1	298.6	301.7	297.9
2	290.5	296.4	304.8
3	299.4	297.9	296.4
4	297.1	300.2	295.6
5	288.3	297.1	298.6
6	299.4	299.4	300.9
$\sigma$	4.46	1.83	3.08
Promedio	295.55	298.78	299.03
<b>Dureza HV</b>	<b>297.79</b>		

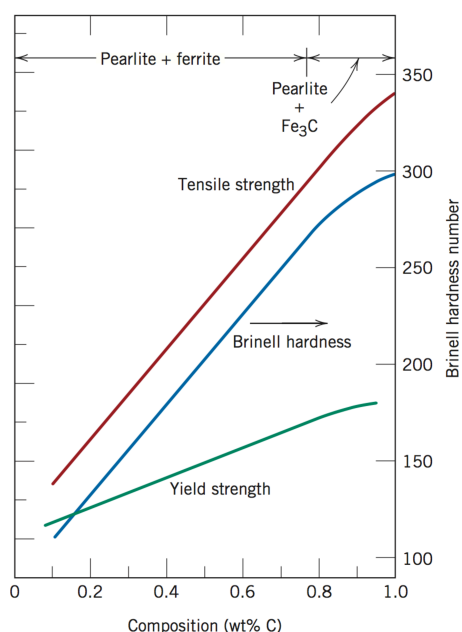
El siguiente gráfico resume los resultados de las mediciones obtenidas y muestra el aumento de la dureza al comparar el acero sin cementar con cada una de las pruebas de cementación:

**Figura 4.1.** Gráfico comparativo de durezas obtenidas en los distintos ensayos de cementado que se realizaron con lecho fluidizado.

#### 4.1.2. Discusión de resultados de dureza

El endurecimiento del acero es un aspecto importante cuando se habla de un tratamiento de cementación. Como se mencionó anteriormente, esta cualidad se obtiene realizando un templado y revenido a la pieza metálica, después del cementado. A pesar de que en este proyecto no se lo hizo, debido a que este no era el objetivo del mismo, es importante que en la práctica común de la industria se lo haga.

Sin embargo, a pesar de que las muestras de acero no fueron templadas ni revenidas, en los ensayos de dureza que se realizaron se pudo evidenciar un aumento en la dureza, como era de esperarse (ver Figura 4.1). Esto se debe a que existe una concentración de carbono más alta que al principio, debido a la capa superficial de cementación. La zona cementada será más dura que el núcleo del acero, ya que a una mayor concentración de carbono se tendrá mayor dureza y mayor resistencia a tracción, tal como se observa en la Figura 4.2.



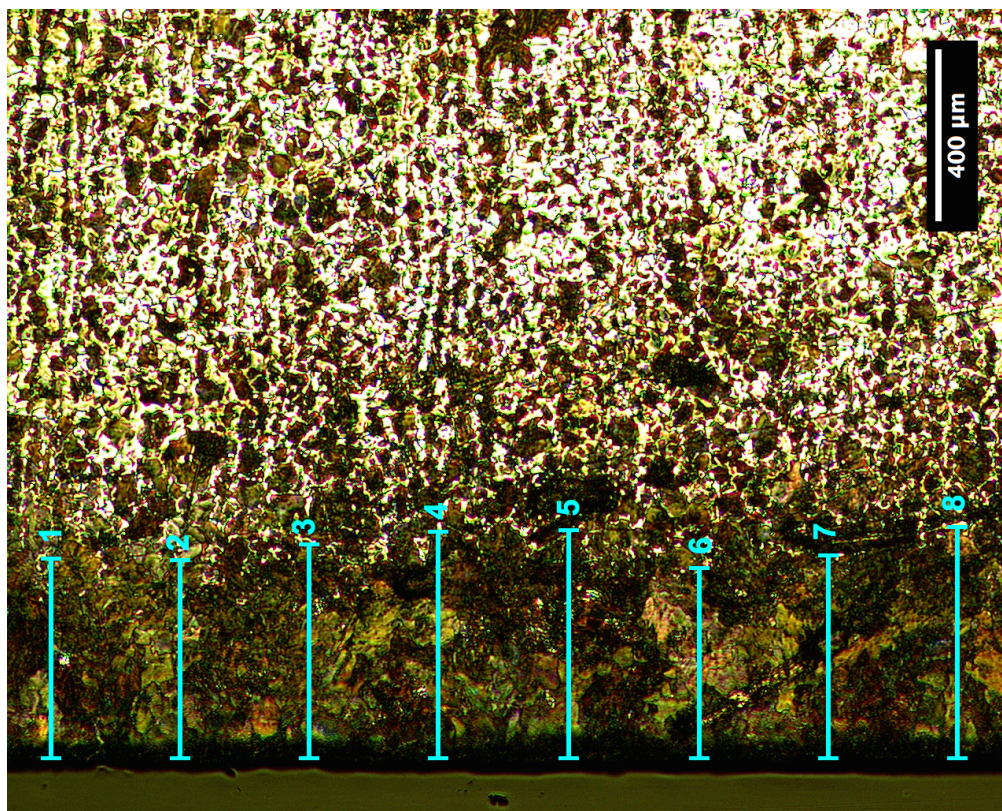
**Figura 4.2.** Límite elástico, resistencia a la tracción y dureza Brinell vs concentración de carbono para aceros al carbono. Fuente [34].

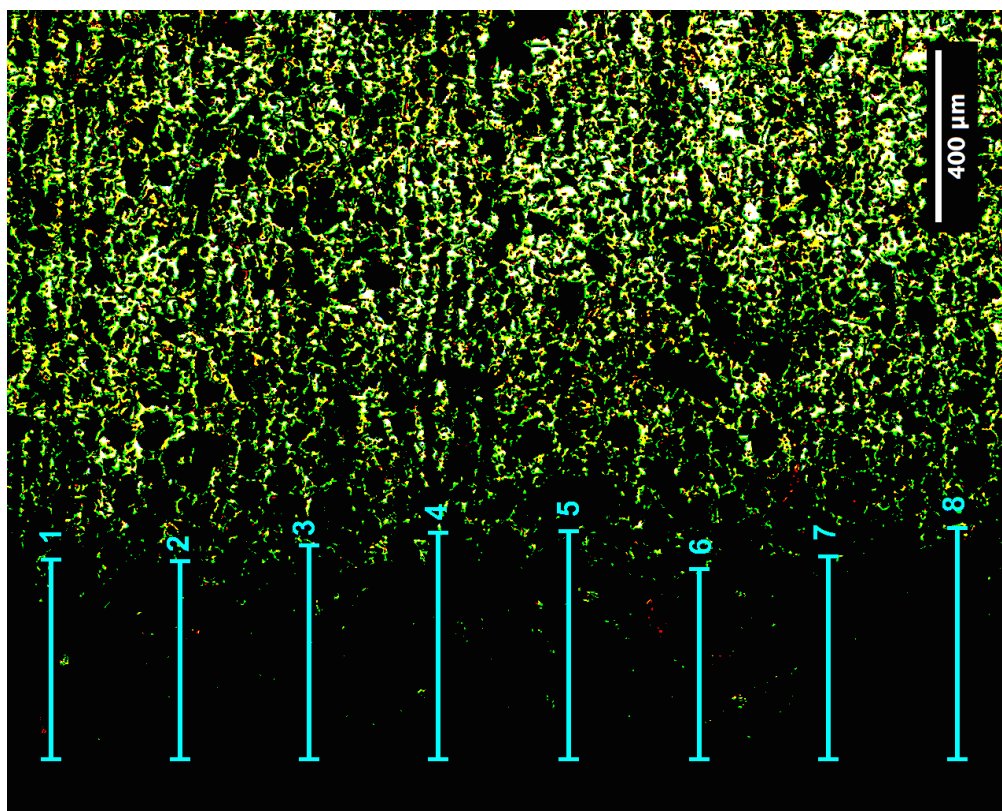


## 4.2. Resultados y discusión de la capa cementada

### 4.2.1. Resultados de la profundidad total de la capa cementada

Para determinar la profundidad total de la capa de cementación se analizaron cuatro metalografías en total, cada una de ellas correspondiente a una de las cuatro pruebas que se realizaron. Utilizando el software de procesamiento de imagen ImageJ, además de obtener la metalografía original, modificando los ajustes de la imagen se pudo obtener otra donde se puede distinguir claramente la zona cementada. De una probeta de cada prueba que se realizó, se realizaron 8 mediciones en su metalografía, para determinar la profundidad total de la capa cementada. El sitio donde se midieron las profundidades están especificados en cada microfotografía y sus valores están tabulados en sus respectivas tablas.



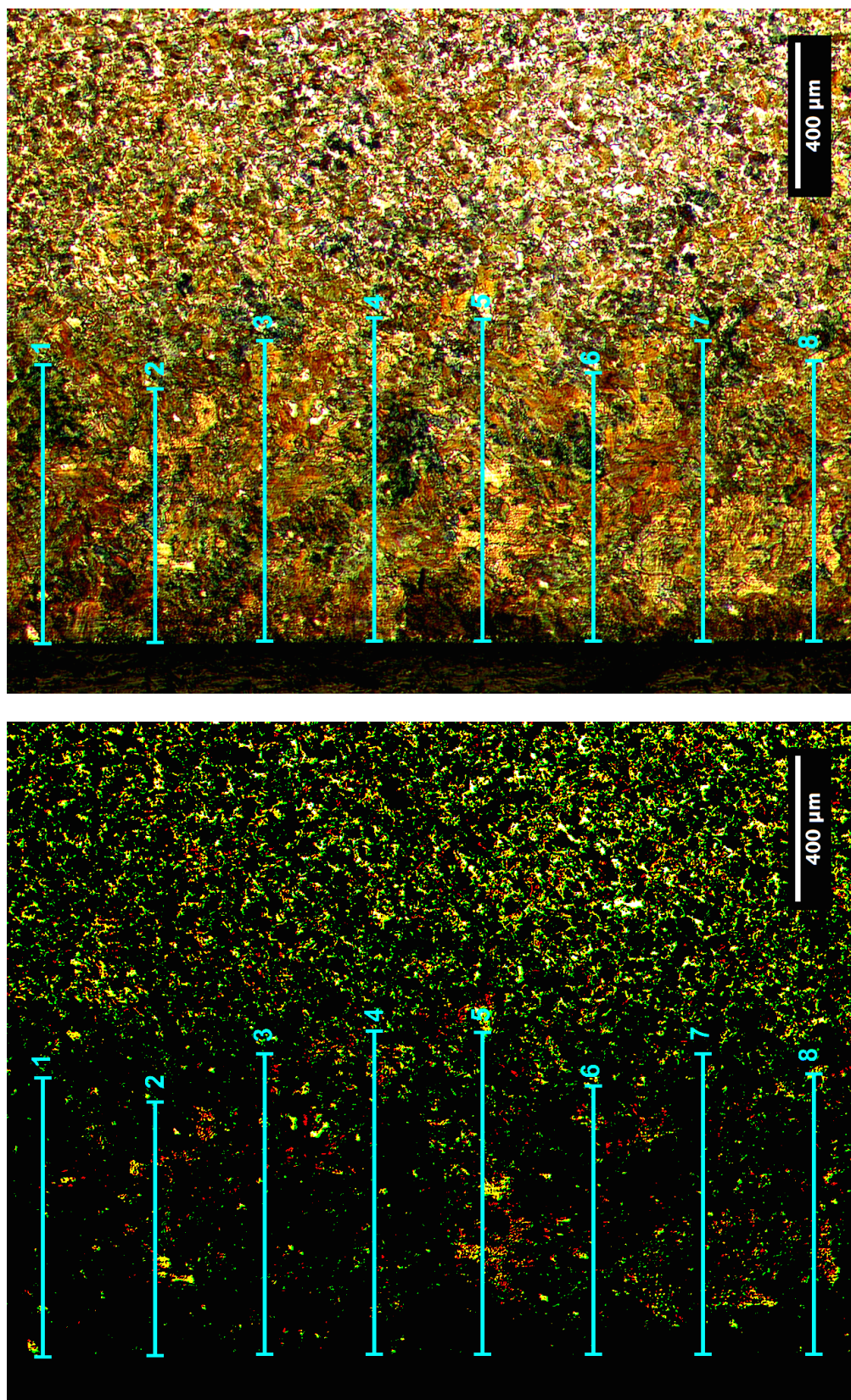


**Figura 4.3.** Micrografías a X100 de la probeta 1 (cementada con lecho fluidizado a 850 °C por 2 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 45 segundos.

**Tabla 4.6.** Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 850 °C por 2 horas.

Prueba 1	
Cementación con lecho fluidizado a 850 °C por 2 horas	
Probeta 1 X100, Etchig 74a – 45 seg	
Medición	Probeta 1 (um)
1	470.16
2	466.52
3	502.96
4	532.12
5	535.76
6	448.3
7	477.44
8	543.06
DE ( $\sigma$ )	36.44
<b>Profundidad total</b>	<b>497.04</b>



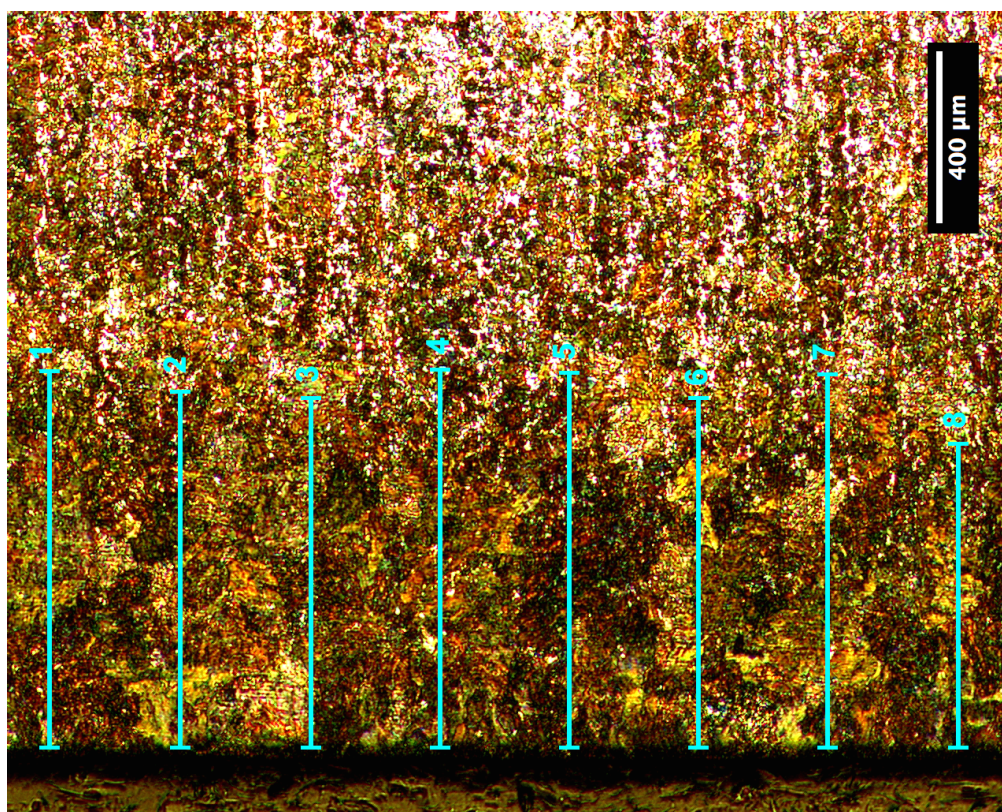


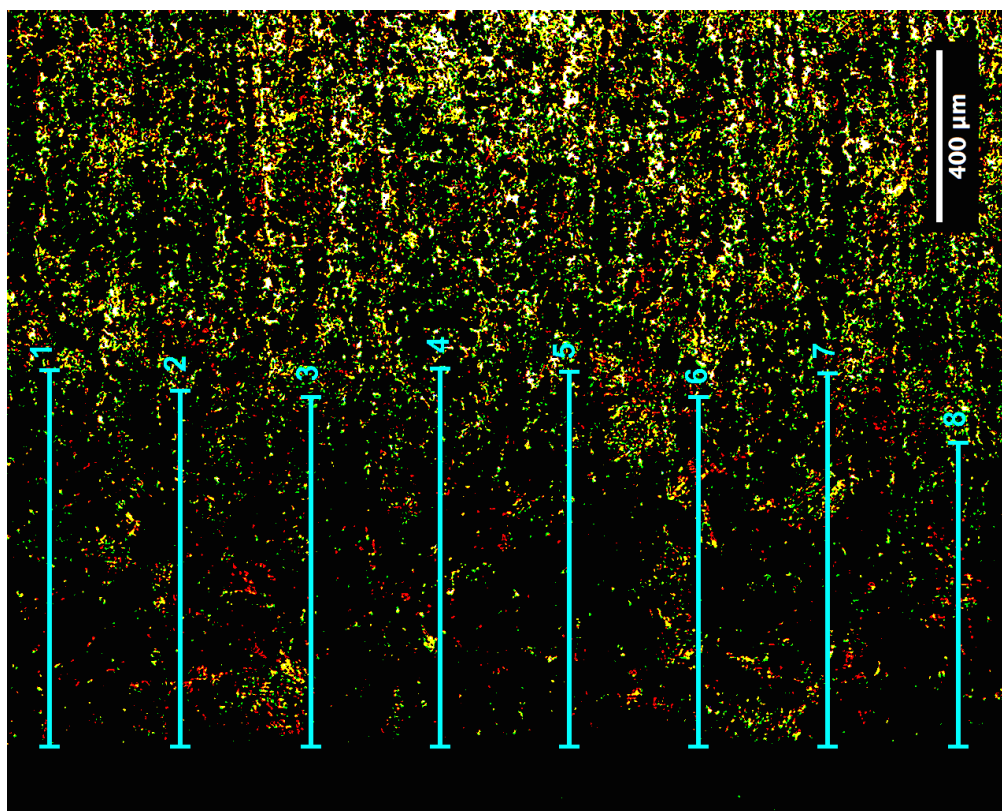
**Figura 4.4.** Micrografías a X100 de la probeta 19 (cementada con lecho fluidizado a 850 °C por 3 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 15 segundos.



**Tabla 4.7.** Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 850 °C por 3 horas.

<b>Prueba 2</b> <b>Cementación con lecho fluidizado a 850 °C por 3 horas</b> Probeta 19 X100, Etchig 74a – 15 seg	
Medición	Probeta 19 (um)
1	769.02
2	699.78
3	827.34
4	889.3
5	885.64
6	739.86
7	827.34
8	772.66
DE ( $\sigma$ )	67.78
<b>Profundidad total</b>	<b>801.37</b>



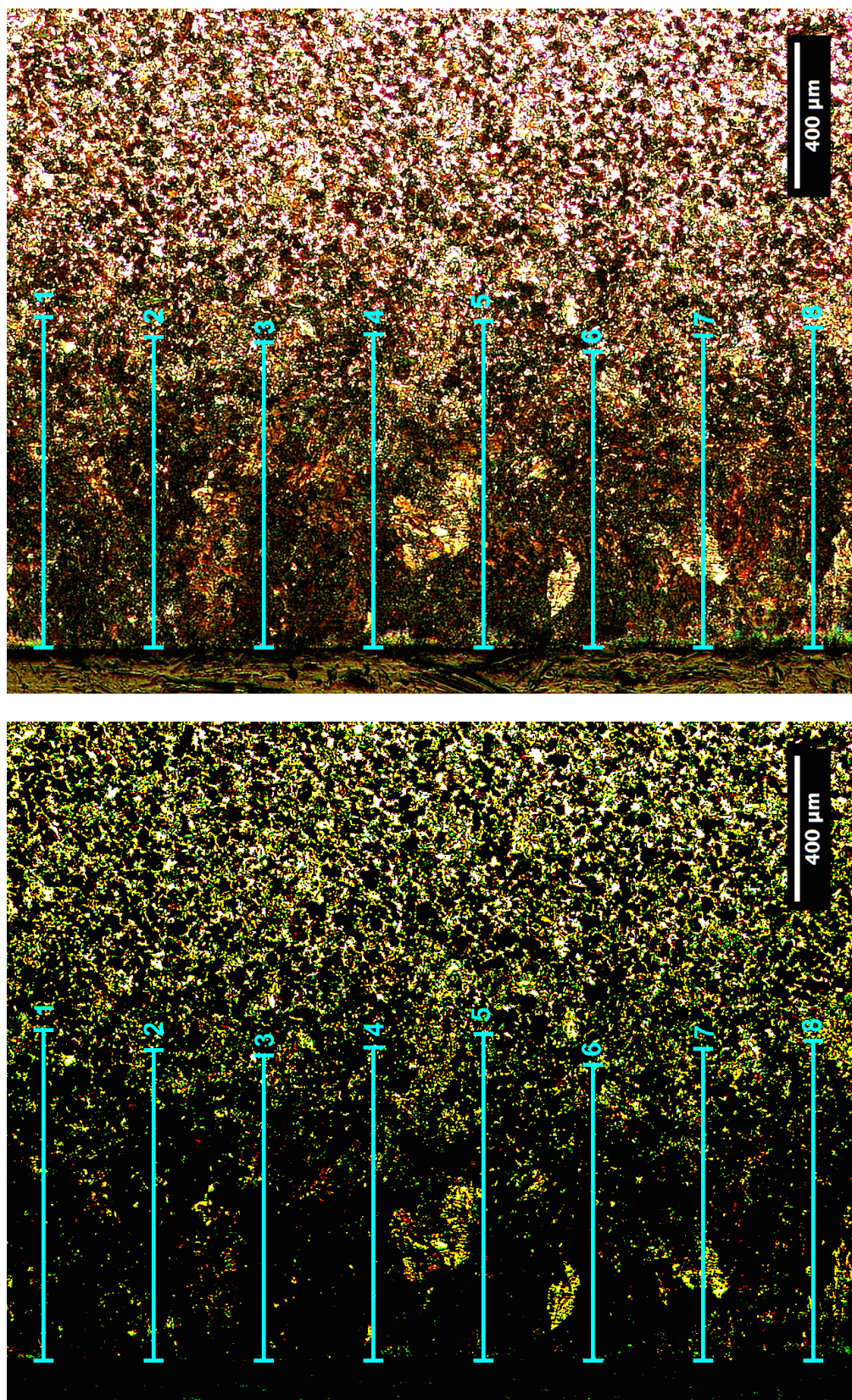


**Figura 4.5.** Micrografías a X100 de la probeta 22 (cementada con lecho fluidizado a 900 °C por 2 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 12 segundos.

**Tabla 4.8.** Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 900 °C por 2 horas.

Prueba 3	
Cementación con lecho fluidizado a 900 °C por 2 horas	
Probeta 22 X100, Etchig 74a – 12 seg	
Medición	Probeta 22 (um)
1	878.36
2	830.98
3	816.4
4	882
5	874.72
6	816.4
7	871.08
8	710.7
DE ( $\sigma$ )	57.48
<b>Profundidad total</b>	<b>835.08</b>





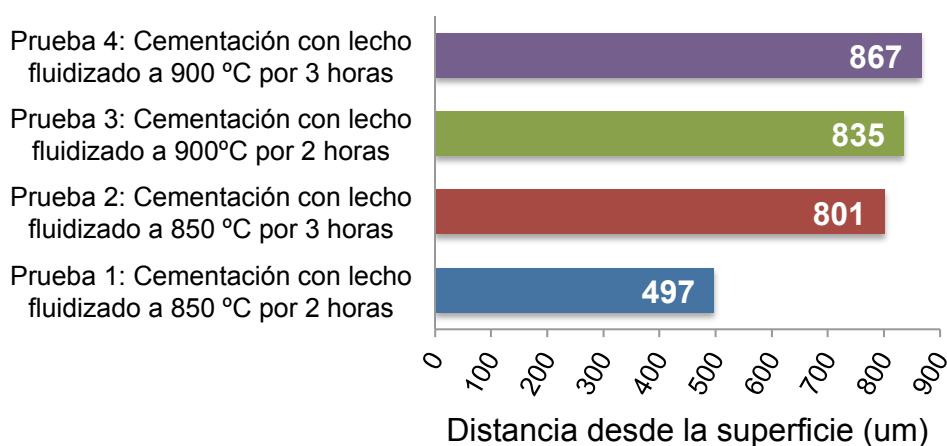
**Figura 4.6.** Micrografías a X100 de la probeta 24 (cementada con lecho fluidizado a 900 °C por 3 horas), atacada con el reactivo 74a (Designación de la ASTM E407-07) por 10 segundos.

**Tabla 4.9.** Profundidad total de la capa carburizada del acero AISI 1018 cementado con lecho fluidizado a 900 °C por 3 horas.

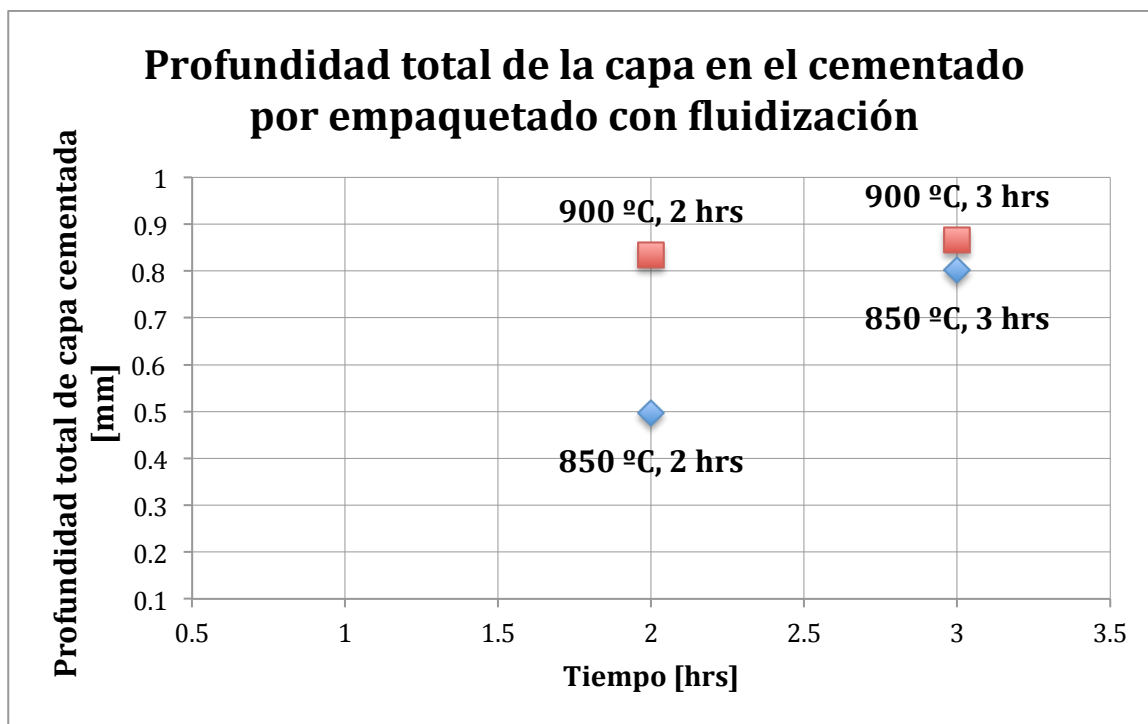
Prueba 4 Cementación con lecho fluidizado a 900 °C por 3 horas Probeta 24 X100, Etchig 74a – 10 seg	
Medición	Probeta 24 (um)
1	911.16
2	856.5
3	841.92
4	863.78
5	900.22
6	816.4
7	860.14
8	882
DE ( $\sigma$ )	30.78
<b>Profundidad total</b>	<b>866.52</b>

La Figura 4.7 compara los valores (en micras) de la profundidad total de las capas cementadas obtenidas en cada una de las pruebas realizadas. La Figura 4.8 muestra la profundidad total de la capa (en mm) obtenida a lo largo del tiempo.

### Profundidad total de la capa cementada



**Figura 4.7.** Gráfico comparativo de la profundidad total de las capas cementadas en las pruebas que se realizaron con lecho fluidizado.



**Figura 4.8.** Profundidad total de la capa en el cementado por empaquetado con fluidización entre 2 y 3 horas para 850 y 900 °C.

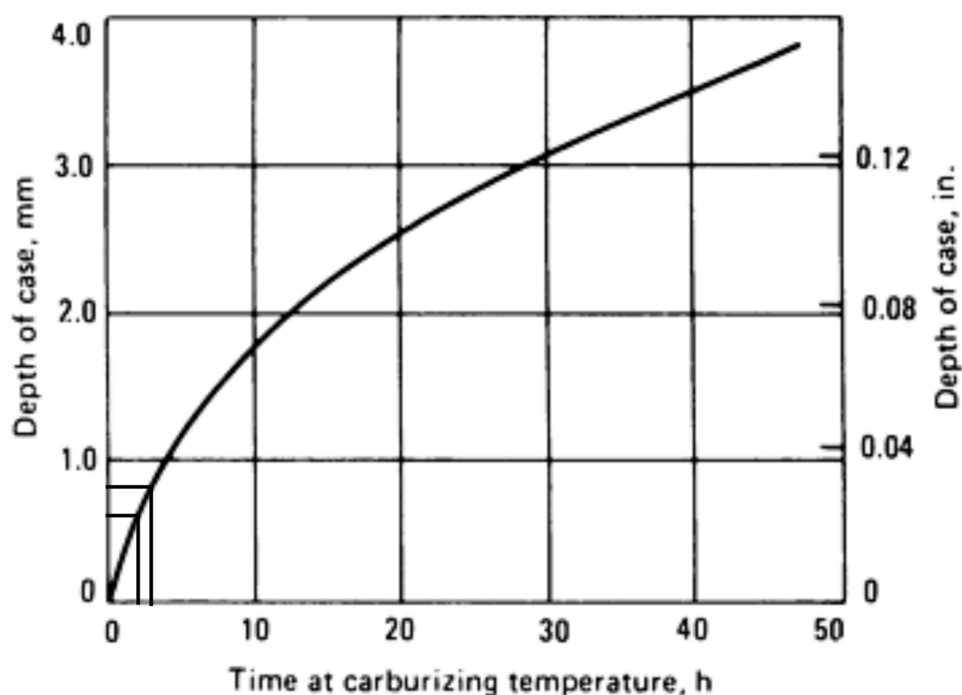
#### 4.2.2. Discusión de resultados de la profundidad de la capa cementada

Al analizar los resultados obtenidos (ver Figura 4.7) con lo que indica la investigación teórica que se realizó, se encuentra que los valores alcanzados en las pruebas son satisfactorios. Primero, como parte de la exploración previa, en la Tabla 4.10 se observa la variación de la profundidad que puede tener la capa cementada en un caso típico de cementado por empaquetado sin fluidización.

**Tabla 4.10.** Características de un caso típico de cementado por empaquetado sin fluidización. Fuente [23].

Pack Carburizing	
Temperatura del proceso	Profundidad típica de la capa
815 - 1090 °C	125 $\mu$ m- 1.5 mm

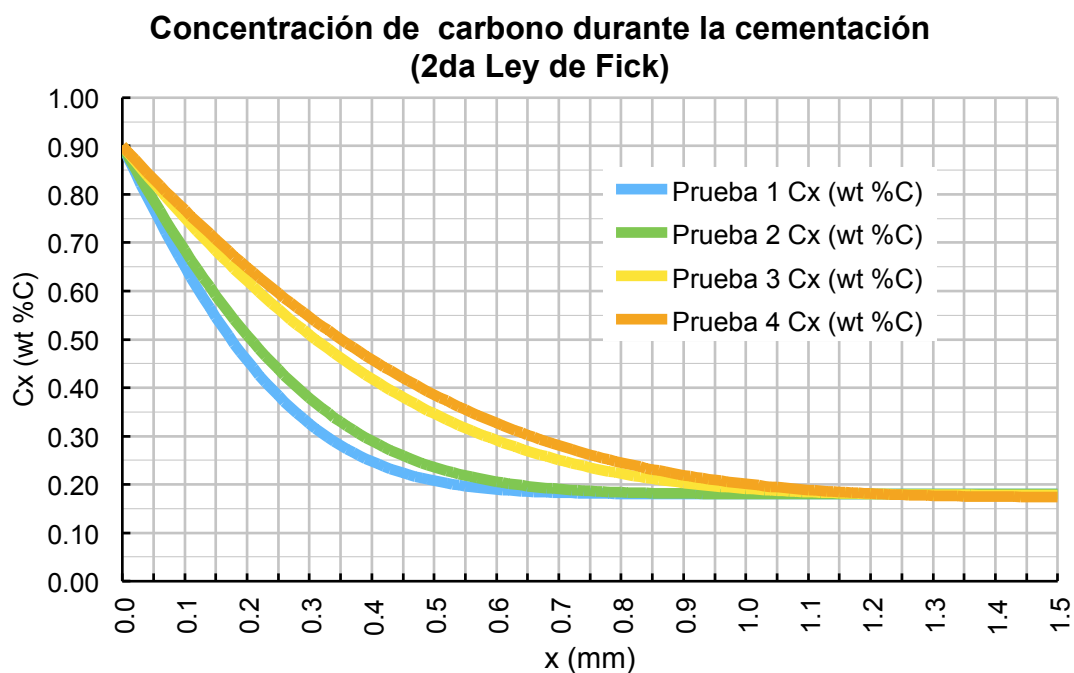
Segundo, en la Figura 2.5 se puede observar que para un cementado por empaquetado sin lecho fluidizado, con las mismas condiciones de temperatura y tiempo, se puede obtener capas cementadas con profundidades que varían entre 0.25 y 0.5 mm, aproximadamente. Así mismo, en la Figura 4.9, se observa que para un cementado por empaquetado a una temperatura de 925 °C (una temperatura superior a las que se manejaron en las pruebas realizadas en este proyecto) entre 2 y 3 horas, se puede alcanzar una profundidad de capa cementada entre 0.6 y 0.8 mm, respectivamente.



**Figura 4.9.** Efecto del tiempo en la profundidad de la capa en un cementado por empaquetado a 925 °C (1700 °F). Fuente [23].

Tercero, a pesar de que en la práctica cuando se realiza una cementación por empaquetado no se tiene un buen control sobre la atmósfera de carbono ni sobre la exactitud en la profundidad de la capa, la información que entregan los perfiles de concentración de carbono son una buena referencia, sobretodo para

considerar la interdifusión atómica que ocurre en un proceso de cementación, ya que este es el principio por el cual se logra modificar químicamente la superficie del acero. Los perfiles de concentración que se obtuvieron, utilizando la segunda ley de Fick, se muestran en la Figura 4.10. En los mismos, se pudo determinar que, para las cuatro pruebas de cementación que se realizaron, el acero tiene una concentración de 0.18% cuando los valores de las profundidades de las capas de cementación son 0.56, 0.66, 0.96 y 1.04 mm, respectivamente. A esa profundidad, con la misma concentración inicial, se termina la zona cementada.



**Figura 4.10.** Perfiles de concentración de carbono durante las cuatro pruebas de cementación.

Por tanto, si se comparan las profundidades de las capas cementadas obtenidas (ver Figuras 4.7 y 4.8) con los valores de la investigación teórica previa (ver Figuras 2.5, 4.9 y Tabla 4.10), se encuentra que los resultados son positivos. Es decir, cuando se analizan los valores obtenidos, las profundidades de la capa



cementada están dentro del rango que se esperaba. Además, los resultados obtenidos superan las referencias que señalan los Handbooks de Prabhudev (ver Figura 2.5) y la ASM (ver Figura 4.9). Por otro lado, los valores que sugieren las curvas de concentración de carbono sobre la profundidad de la capa (ver Figura 4.10), son similares a los obtenidos, aunque en algunos casos sus valores son superiores, esto se debe a que las curvas de concentración (teóricas) asumen una concentración de carbono en la superficie ( $C_s$ ) constante y un control total sobre la atmósfera y la profundidad de la capa, y en la práctica esto no sucede.

Finalmente, centrándose solamente en los resultados obtenidos, se puede observar (ver Figura 4.7) que la profundidad de capa obtenida en las pruebas 2, 3 y 4; supera entre un 61-74% a la prueba 1. Esto indica que, si se requiere una capa cementada no muy gruesa (0,5 mm), se puede realizar el cementado a una temperatura de 850 °C, por 2 horas. De lo contrario, si se pretende conseguir una capa gruesa (0,8 mm en adelante), habrá que aumentar la temperatura 100 °C más, o aumentar el tiempo y realizar el proceso por 3 horas en lugar de 2.

Por todo esto, comparando la investigación teórica y los resultados obtenidos en las pruebas (utilizando un lecho fluidizado), se pudo comprobar que la técnica de fluidización puede complementar al proceso de cementado de buena manera para la obtención de mejores resultados.

## **5. Conclusiones y Recomendaciones**

### **5.1. Conclusiones**

Una vez terminadas las pruebas de cementación es importante comparar los resultados con lo que se esperaba obtener. El éxito de este proyecto de cementado por empaquetado, utilizando un lecho fluidizado, será haber obtenido una capa de cementación como se indica en la investigación teórica previa. Y, efectivamente, como se ha demostrado en la discusión de los resultados obtenidos, se consiguió una capa superficial con un porcentaje de carbono superior al que tenía originalmente el acero. Esto se puede evidenciar tanto en los resultados de los análisis metalográficos, como en los de los ensayos de dureza. Por todo esto, sustentando la investigación teórica previa con los resultados obtenidos se puede concluir:

- Se logró alcanzar todos los objetivos del proyecto que se plantearon en un inicio.
- Los valores de dureza obtenidos aumentan conforme se eleven el tiempo o temperatura en el proceso de cementado. Lo que demuestra que, tal como se observa en los perfiles de concentración de carbono, a mayor tiempo/temperatura se tiene mayor concentración de carbono y, por tanto, mayor dureza. Cabe señalar que los valores de dureza corresponden a un acero que no fue templado ni revenido tras su cementación.
- En el análisis metalográfico se evidencia claramente la capa superficial de cementación, lo que demuestra que el proceso se ha desarrollado de manera exitosa.
- Un acero cementado muestra una zona cementada, una zona de transición y

- su núcleo. La zona cementada tendrá un contenido de carbono superior al de su núcleo.
- Las probetas que fueron cementadas, en las cuatro pruebas distintas, alcanzaron profundidades en la capa cementada entre 0.5 y 0.8 mm, lo cual satisface lo que se esperaba conseguir, es decir, lograr una profundidad mayor que en un proceso de cementado sin lecho fluidizado.
- La constante de difusión (que depende directamente de la temperatura) y el tiempo son las variables que determinarán el comportamiento del proceso de interdifusión atómica. De esta forma, la variación en los resultados de la profundidad de la capa cementada, demuestran que el proceso de cementado se produce mediante difusión.
- El proceso de cementado se puede realizar utilizando carbón activado (material portador de carbono) y carbonato de sodio (como activador), en una proporción de 90% carbón activado y 10% carbonato de sodio.
- Si se complementa el cementado por empaquetado con un lecho fluidizado, se puede conseguir mejores resultados que en un proceso de cementado que no utilice esta técnica.
- El uso de un lecho fluidizado reduce el tiempo que se debe emplear para el cementado. Así mismo, utilizando un lecho fluidizado se puede realizar el proceso a temperaturas más bajas. Todo esto se debe a que el coeficiente de transferencia de calor en un lecho fluidizado, es superior al que se tiene en un proceso de cementado por empaquetado sin fluidización.
- Considerando las ventajas que el lecho fluidizado ofrece y que es una técnica adaptable a cualquier tipo de tratamiento térmico, es importante que se considere su uso como un excelente complemento de cualquier tratamiento

térmico.

- Desde el punto de vista de disponibilidad de los materiales y equipos utilizados, el tratamiento de cementado propuesto es viable para desarrollarlo en el país. Su adaptabilidad y fácil manejo del proceso, lo convierten en una excelente opción para implementarlo en el medio local. Además, en cuanto a la emisión de gases, este proceso tiene un grado de nocividad casi nulo, ya que las emisiones de argón y dióxido de carbono son bajas y, por tanto, no son tóxicas. Sin embargo, se recomienda trabajar en un espacio mínimamente ventilado.
- La utilización de este proyecto como referencia, garantiza que un acero va a poder ser cementado de manera satisfactoria.

## **5.2. Recomendaciones**

- Es importante tomar en cuenta todas las medidas y el uso del equipo de seguridad para poder llevar a cabo este proceso. Así, se evitará cualquier percance que afecte la salud personal, a pesar de que la manipulación de las sustancias y reactivos que se utilizan en el proyecto no tienen un grado de toxicidad considerable.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en la profundidad de la capa cementada, cuando se vaya a realizar el proceso de cementado se recomienda hacerlo a una temperatura de 850 °C por 3 horas o, a 900 °C por 2 horas; ya que si se trabaja a 850 °C y por 2 horas, se conseguirá una capa de cementación inferior en, al menos, un 60%.
- En la práctica industrial convencional, se recomienda realizar un templado y

revenido después del cementado. Solo así, la pieza alcanzará una dureza superficial muy alta, resistente al desgaste, y sin perder tenacidad en su núcleo.

- Se recomienda la aplicación del tratamiento de cementado para piezas de acero de bajo contenido de carbono. Al ser un material económico, que responde bien a este tipo de tratamiento y que es de uso comercial frecuente en la industria; se convierte en un material idóneo para ser cementado y otorgarle mejores propiedades para cualquier fin que vaya a tener.
- El uso de un lecho fluidizado presenta varias ventajas, por lo cual, su aplicación debería ser el inicio de nuevas investigaciones de un sin número de procesos en los que se podría utilizar el método de fluidización.

## 6. Referencias Bibliográficas

- [1] Bautermic S.A. (2013, Marzo-Abril). Los Tratamientos Térmicos en la Industria. *Tratamientos Térmicos*, 136. Recuperado de <http://www.metalspain.com/TRATAMIENTOSTERMICOS-136.pdf>
- [2] Tratamiento térmico. (2015, 13 de mayo). En *Wikipedia*. Recuperado el 24 de abril de 2015 desde [http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento\\_térmico](http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento_térmico)
- [3] Carranza, G. A. (2012). *Tratamientos Térmicos* [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de <http://es.slideshare.net/albertojeca/tratamientos-termoquimicos>
- [4] Groover, M. P. (2007). Metales. En Del Bosque, A. R. A. (Ed.), *Fundamentos de la Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas* (3a. ed., pp. 90-126). México: McGraw-Hill Interamericana.
- [5] Cementación del acero. (s.f.). En *Sabelotodo.org, la web del saber*. Recuperado de <http://www.sabelotodo.org/metalurgia/cementacion.html>
- [6] Díaz, Felipe. (2007). *Lecturas de Ingeniería I: Endurecimiento superficial del acero* [Documento PDF]. Recuperado de [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/endurecimiento superficial del acero.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/endurecimiento%20superficial%20del%20acero.pdf)
- [7] Aalberts Industries Material Technologies. (s.f.). *Cementación: Carburación, carbonitruración* [Documento PDF]. Recuperado de <http://www.metalia.es/guiaeempresas/T.TermicosTraterh/pdf/Cementacion.pdf>
- [8] Tratamientos Térmicos (2014, Enero-Febrero). Tratamientos Térmicos. Protocolo: Curso de Materiales (1ª Parte). *Tratamientos Térmicos*, 141. Recuperado de <http://metalspain.com/tratamientos-termicos-Jan2014.pdf>
- [9] Maya, Christyam. (s.f.). *Tratamientos térmicos de los aceros* [Documento PDF]. Recuperado del Sitio web del Departamento de Metalurgia de la Universidad Tecnológica de Pereira de Colombia: [http://blog.utp.edu.co/metalografia/files/2010/10/Tratamientos-termicos\\_1.pdf](http://blog.utp.edu.co/metalografia/files/2010/10/Tratamientos-termicos_1.pdf)
- [10] Cementación. (s.f.). En *Estudio y Ensayo de Materiales: Wordpress*. Recuperado de <https://estudionyensayo.files.wordpress.com/2008/11/cementacion.pdf>
- [11] ASM Handbook Committee. (1973). *ASM Handbook, Volume 8: Metallography, Structures, and Phase Diagrams* (8va ed.). Metals Park, Ohio: ASM International.
- [12] Martínez, Isidoro. (s.f.). *Thermal Effects on Materials* [Documento PDF]. Recuperado del Sitio Web del Departamento de Motopropulsión y

Termofluidodinámica de la Universidad Politécnica de Madrid:  
<http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/ot1/Thermal%20effects%20on%20materials.pdf>

- [13] Tratamiento Térmico. (s.f.). En *EcuRed: Conocimiento con todos y para todos*. Recuperado de [http://www.ecured.cu/index.php/Tratamiento\\_térmico](http://www.ecured.cu/index.php/Tratamiento_térmico)
- [14] Softening: Annealing. (s.f.). En *engineering Fundamentals*. Recuperado de [http://www.efunda.com/processes/heat\\_treat/softening/annealing.cfm](http://www.efunda.com/processes/heat_treat/softening/annealing.cfm)
- [15] Traditional Services. (s.f.). En *Advance Heat Treat Corp*. Recuperado de <http://www.ahtweb.com/services/traditional-services.aspx>
- [16] Tratamientos Térmicos. (s.f.). En *Sistemas en la Función Productiva de las Organizaciones*. Recuperado de <http://sifunpro.tripod.com/termos.htm>
- [17] Woges, Ryan. (s.f.). *Process Annealing*. Recuperado de <http://metals.about.com/od/metallurgy/g/Process-Annealing.htm>
- [18] Tratamientos Aceros. (s.f.). Recuperado del Departamento de Tecnología del I.E.S. Virgen Del Espino: <http://www.v-espino.com/~tecnologia/tecnol/RES%DAMENES/1-4%20tratamientos%20aceros.pdf>
- [19] Cimiano, G. (2002, 01 de julio). *Introducción a los tratamientos térmicos* en Interempresas.net. Recuperado de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/2506-Introduccion-a-los-tratamientos-termicos.html>
- [20] Tratamientos Termoquímicos. (s.f.). En *Sistemas en la Función Productiva de las Organizaciones*. Recuperado de <http://sifunpro.tripod.com/termoquim.htm>
- [21] Heat Treating for Automotive & Transportation Equipment. (s.f.). En *Praxair*. Recuperado de <http://www.praxair.com/industries/automotive-and-transportation/heat-treating>
- [22] Carburizing. (s.f.). En *MetLab*. Recuperado de <http://www.metlabheattreat.com/carburizing.html>
- [23] ASM Handbook Committee. (1991). *ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating* (10ma ed.). Metals Park, Ohio: ASM International.
- [24] Mesa, Dairo. (s.f.). *Tratamientos térmicos de los aceros* [Documento PDF]. Recuperado del Sitio web del Departamento de Materiales y Procesos de Manufactura de la Universidad Tecnológica de Pereira de Colombia: <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/clase9ttteoria.pdf>
- [25] Sabogal, Alejandro. (2012). *Cementación* [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de <http://www.slideshare.net/as9103/cementacion>

- [26] Tema VI: Tratamientos térmicos. (s.f.). En *Ingeniería de Sistemas Educativos*. Recuperado de [http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1\\_VI.html#seis](http://www.aprendizaje.com.mx/Curso/Proceso1/Temario1_VI.html#seis)
- [27] Vacuum carburizing furnace ModulTherm. (s.f.). En *Daido Steel*. Recuperado de <http://www.daido.co.jp/en/products/machinery/mtf.html>
- [28] Thirugnanam, K. (2015). *Heat Treatment* [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de <http://www.slideshare.net/moh481989/17767705-heatreatmentoct08>
- [29] F, John. (2009, 24 de octubre). Case Hardening [Msj 5]. Mensaje publicado en <http://www.model-engineer.co.uk/forums/postings.asp?th=32838>
- [30] Montesdeoca, Josué. (2014, 19 de junio). *Proceso de Cementación*. Recuperado de <https://www.academia.edu/9460844/Cementacion>
- [31] Sharma, C. Romesh. (1996). *Principles of Heat Treatment of Steels*. Nueva Delhi, India: New Age International.
- [32] Hunter, Mike. (2009, 24 de abril). *Thread: Pack Carburizing* [Msj 6]. Mensaje publicado en <http://www.practicalmachinist.com/vb/general/pack-carburizing-180008/>
- [33] Prabhudev, H. K. (1988). *Handbook of Heat Treatment of Steels*. Nueva Delhi, India: Tata McGraw-Hill.
- [34] Callister, William. (2007), *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7ma ed.). Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc.
- [35] Goncharova, Lyudmila. (s.f.). *Chapter 5: Diffusion*. Recuperado del Sitio web del Departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Western Ontario de Canadá: [http://www.physics.uwo.ca/~lgonchar/courses/p2800/Chapter5\\_Diffusion\\_Handouts.pdf](http://www.physics.uwo.ca/~lgonchar/courses/p2800/Chapter5_Diffusion_Handouts.pdf)
- [36] Cabrera, Raúl. (2010). *Capítulo 3: difusión en estado sólido* [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de <http://es.slideshare.net/raecabrera/capitulo-3-difusin-en-estado-slido-5789795>
- [37] Campbell, Flake. C. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. Metals Park, Ohio: ASM International.
- [38] Goldstein, J. I. & Moren, A. E. (s.f.). *Diffusion Modeling of the Carburization Process* [Documento PDF]. Recuperado de <http://people.umass.edu/jig0/files/83.pdf>
- [39] Ramirez, Nilson. (2011). *Fluidización*. Recuperado de <http://proindustriales.blogspot.com/2013/05/fludizacion.html>



- [40] Cabrera, Adán. (2004). *El efecto de la temperatura de operación sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando vapor sobrecalentado para diferentes tipos de partículas* (Tesis Licenciatura). Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/cabrera\\_v\\_a/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo3.pdf)
- [41] Tratamiento Térmico. (s.f.). En *Böhler Perú*. Recuperado de [http://www.bohlerperu.com/files/tratamiento\\_termico.pdf](http://www.bohlerperu.com/files/tratamiento_termico.pdf)
- [42] Fluidización. (2014, 14 de septiembre). En *Wikipedia*. Recuperado el 12 de mayo de 2015 desde [https://es.wikipedia.org/wiki/Fluidización#/media/File:Fluidized\\_Bed\\_Reactor\\_Graphic.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Fluidización#/media/File:Fluidized_Bed_Reactor_Graphic.svg)
- [43] Vázquez, J. C. (2011). *Diseño de un reactor de lecho fluido de laboratorio para el estudio de la conversión termoquímica de biomasa* (Proyecto fin de Carrera). Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20250/fichero/Capitulos%252F05++CAPITULO+III+-+Fluido-din%E1mica+de+lechos+fluidizados.pdf>
- [44] Vives, Serafí. (2012, 11 de enero). *Atmósferas en los tratamientos térmicos* en Interempresas.net. Recuperado de <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/59954-Atmosferas-en-los-tratamientos-termicos.html>
- [45] Luna, Jesús. (2005). *Cementación sólida de aceros* (Tesis Pregrado). Recuperado de <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150661.PDF>
- [46] Tratamiento Térmico II: Recocer, templar, soldar, forjar, nitrificar. (s.f.). En *Nabertherm*. Recuperado de [http://www.nabertherm.com/produkte/thermprozesstechnik/thermprozesstechnik2\\_spanisch.pdf](http://www.nabertherm.com/produkte/thermprozesstechnik/thermprozesstechnik2_spanisch.pdf)
- [47] Tecnología del Lecho Fluidizado. En *Aceros del Perú S.A.C.* Recuperado de <http://www.acerosdelperu.pe/es/tecnologia-lecho-fluidizado-aceros-del-peru.php>
- [48] Calle, G. (2009). *Dureza Brinell*. Recuperado del Sitio web de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira de Colombia: <http://www.utp.edu.co/~gcalle/Contenidos/DurezaHB.htm>
- [49] Dureza. (2015, 30 de junio). En *Wikipedia*. Recuperado el 24 de mayo de 2015 desde <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Dureza&oldid=83500892>.
- [50] Durómetro. (2015, 30 de abril). En *Wikipedia*. Recuperado el 24 de mayo de 2015 desde <https://es.wikipedia.org/wiki/Durómetro>

- [51] Castro, Miguel. (2013, 27 de marzo). *Dureza Vickers y Microdureza* [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de <http://es.slideshare.net/tango67/dureza-vickers-y-microdureza>
- [52] Frade, Rubén. (2013, 21 de noviembre). *Propiedades físico-mecánicas de los materiales*. Recuperado de <https://fradeblogs.wordpress.com/2013/11/21/propiedades-fisico-mecanicas-de-los-materiales/>
- [53] Dureza Vickers. (n.f.). En *Especialidades Industriales Kansert*. Recuperado de <http://www.kansert.es/Vickers.swf>
- [54] Svoboda, H. & Blangino, Eugenia. (n.f.). *Dureza*. Recuperado del Sitio web del Departamento de Mecánica de la Universidad de Buenos Aires. <http://materias.fi.uba.ar/6716/Dureza.pdf>
- [55] Industrial Chemicals. (n.f.). En *Dev Alums & Chemicals*. Recuperado de <http://www.sme.in/devalums/product1.html>
- [56] AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel. (n.f.). En *Yiannakis Andreou Ltd.* [Documento PDF]. Recuperado de <http://www.yandreou.com/wp-content/uploads/2014/08/AISI-1018-Mild-Low-Carbon-Steel-PDF.pdf>
- [57] Análisis Metalográfico. (n.f.). En *Calidad y Técnica Industrial, S.A. de C.V.* Recuperado de [http://www.cyti.com.mx/analisis\\_metalografico.asp](http://www.cyti.com.mx/analisis_metalografico.asp)
- [58] ASTM Internacional. (2007). *ASTM E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. West Conshohocken, PA.
- [59] Herring, Daniel. (2014, 8 de Julio). *Interpreting Carburized Case Depths*. Recuperado de <http://www.industrialheating.com/articles/91763-interpreting-carburized-case-depths>
- [60] Case Depth Hardness Testing. (n.f.). En *Newage Hardness Testing*. Recuperado de <http://www.hardnesstesters.com/Applications/Case-Depth-Testing.aspx>
- [61] Qvarnström, Hans. (1989). Technical Note: A mathematical formula for transformation between the steel hardness scales of Rockwell C and Vickers. *Journal of Heat Treating*, 7, 65-67. Recuperado de <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02833189#page-1>
- [62] ASTM Internacional. (2007). *ASTM E140-02: Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*. West Conshohocken, PA.